

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**MĚŘENÍ PARAMETRŮ OPTICKÝCH A OPTO-  
ELEKTRICKÝCH KOMPONENT**

MEASUREMENT OF OPTICAL AND OPTO-ELECTRICAL COMPONENTS PARAMETERS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Veronika Horňáková**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Petr Münster, Ph.D.**

**BRNO 2020**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

**Studentka:** Bc. Veronika Horňáková

**ID:** 189507

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## Měření parametrů optických a opto-elektrických komponent

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je teoretický rozbor optických a opto-elektrických komponent - pasivní dělič, cirkulátor, izolátor, laserová dioda, fotodetektor, modulátor. Pro jednotlivé komponenty budou definovány základní parametry včetně vysvětlení těchto parametrů. V rámci diplomové práce bude proveden návrh měření vybraných parametrů 4 různých komponent. Následně bude provedeno měření těchto parametrů a jejich srovnání s katalogovými hodnotami. Výsledkem práce bude soubor protokolů měření včetně stanovení metodik měření jednotlivých parametrů.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] DUTTA, Niloy K. a Xiang ZHANG. Optoelectronic Devices [online]. New Jersey: WORLD SCIENTIFIC, 2018 [cit. 2019-09-14]. DOI: 10.1142/10894. ISBN 978-981-323-669-1.
- [2] AL-AZZAWI, Abdul. Advanced manufacturing for optical fibers and integrated photonic devices. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2016]. ISBN 9781498729451.

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 1.6.2020

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Münster, Ph.D.

**prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**  
předseda oborové rady

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Táto diplomová práca sa zaoberá optickými a optoelektronickými komponentami. Prvá časť práce popisuje vybrané tri optické a tri optoelektronické komponenty. Z optických komponent to sú delič výkonu, izolátor a cirkulátor. Z optoelektronických sú to laserová dióda, fotodetektor a modulátor. Pri každej súčiastke boli definované základné parametre merania. V experimentálnej časti boli zmerané štyri vybrané komponenty od rôznych výrobcov. Vybrané komponenty sú delič výkonu, izolátory, cirkulátory a laserová dióda. Následne boli zmerané parametre porovnané s katalógovými hodnotami.

## KLÚČOVÉ SLOVÁ

Delič výkonu, izolátor, cirkulátor, laserová dióda, fotodetektor, modulátor

## ABSTRACT

This diploma thesis deals with optical and optoelectronic components. The first part describes three selected optical and three optoelectronic components. Optical components include power divider, isolator and circulator. The optoelectronic ones are laser diode, photodetector and modulator. Basic measurement parameters were defined for each component. In the experimental part, four components from different manufacturers were measured. Selected components are power dividers, isolators, circulators and a laser diode. Subsequently, the measured parameters were compared with the catalog values.

## KEYWORDS

Power divider, isolator, circulator, laser diode, photodetector, modulator

HORŇÁKOVÁ, Veronika. *Měření základních parametrů optických a opto-elektrických komponent*. Brno, 2020, 76 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedúci práce: Ing. Petr Münster, Ph.D.



## VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že som svoju diplomovou prácu na tému „Měření základních parametrů optických a opto-elektrických komponent“ vypracovala samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce, využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autorka uvedenej diplomovej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušila autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahla nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomá následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákoníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....  
podpis autora(-ky)

## POĎAKOVANIE

Rada by som poďakovala môjmu vedúcemu diplomovej práce pánovi Ing. Petrovi Münsterovi, Ph.D. za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)

## POĎAKOVANIE

Výzkum popsaný v tejto diplomovej práci bol realizovaný v laboratóriách podporených projektom SIX; registračné číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačný program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno .....

.....  
podpis autora(-ky)

# OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>13</b>
<b>1 Optické komponenty</b>	<b>14</b>
<b>2 Delič výkonu</b>	<b>15</b>
2.1 Typy deličov výkonu . . . . .	16
2.2 Základné parametre . . . . .	16
2.3 Využitie deliča výkonu . . . . .	17
<b>3 Izolátor</b>	<b>18</b>
3.1 Delenie izolátorov . . . . .	19
3.2 Základné parametre . . . . .	24
3.3 Využitie optického izolátora . . . . .	24
<b>4 Cirkulátor</b>	<b>25</b>
4.1 Delenie optických cirkulátorov . . . . .	26
4.2 Základné parametre . . . . .	26
4.3 Využitie cirkulátora . . . . .	26
<b>5 Opto-elektrické komponenty</b>	<b>28</b>
<b>6 Laserová dióda</b>	<b>29</b>
6.1 Delenie laserových diód . . . . .	32
6.2 Základné parametre . . . . .	35
6.3 Využitie optických diód . . . . .	41
<b>7 Fotodetektor</b>	<b>42</b>
7.1 Delenie fotodetektorov . . . . .	43
7.2 Základné parametre . . . . .	44
7.3 Využitie fotodetektora . . . . .	45
<b>8 Modulátor</b>	<b>46</b>
8.1 Druhy modulátorov . . . . .	47
8.2 Základné parametre . . . . .	48
8.3 Využitie elektro-optického modulátora . . . . .	48
<b>9 Experimentálna časť</b>	<b>49</b>
9.1 Návrh merania optických komponentov . . . . .	49
9.1.1 Meranie Deličov výkonu, izolátorov a cirkulátorov . . . . .	49

9.1.2	Namerané hodnoty . . . . .	51
9.2	Návrh merania opto-elektronických komponentov . . . . .	70
9.2.1	Meranie laserových diód . . . . .	70
<b>Záver</b>		<b>72</b>
<b>Literatúra</b>		<b>73</b>

# ZOZNAM OBRÁZKOV

1.1	Prenos svetlovodom [1]. . . . .	14
2.1	Schéma optického deliča výkonu [2]. . . . .	15
3.1	Účinok Faradayovho rotátora na lineárne polarizované svetlo [8]. . . .	18
3.2	Izolátor závislí na polarizácii [7]. . . . .	19
3.3	Izolátor nezávislí na polarizácii [7]. . . . .	20
3.4	Charakteristika pevného úzkopásmového izolátora [7]. . . . .	21
3.5	Charakteristika nastaviteľného úzkopásmového izolátora [7]. . . . .	21
3.6	Charakteristika pevného širokopásmového izolátora [7]. . . . .	22
3.7	Charakteristika nastaviteľného širokopásmového izolátora [7]. . . . .	23
3.8	Charakteristika pevného úzkopásmového izolátora [7]. . . . .	24
4.1	Funkcia optického cirkulátora [12]. . . . .	25
4.2	Zosilňovací systém tvorený cirkulátorom [12]. . . . .	27
4.3	Duplexný vysielač/príjmač systém [12]. . . . .	27
5.1	Základné zapojenie optického spoja [1]. . . . .	28
6.1	Stimulovaná emisia fotónov [14]. . . . .	29
6.2	Spontánna emisia [14]. . . . .	30
6.3	Závislosť emitovaného optického výkonu na budiacom prúde [14]. . .	31
6.4	Porovnanie šírky pásma emitovaného žiarenia pri spontánnej a stimu- lovanej emisii [14]. . . . .	31
6.5	Príklad homoštruktúrnej diódy [15]. . . . .	32
6.6	Príklad heteroštruktúrnej diódy [15]. . . . .	33
6.7	Príklad diódy s dvojitou heteroštruktúrou [15]. . . . .	33
6.8	Príklad DFB laseru [15]. . . . .	34
6.9	Schéma z hľadiska vyžarovania [15]. . . . .	35
6.10	Spektrá polovodičových zdrojov žiarenia [17]. . . . .	40
7.1	Odozva detektora na rôzne materiály [25]. . . . .	42
7.2	Schéma fotodiódy PIN [25]. . . . .	43
8.1	Elektro-optický modulátor [31]. . . . .	46
8.2	Schéma akusto-optického modulátora [33]. . . . .	47
8.3	Funkcia elektro-optického modulátora vo vysielačom systéme [32]. . .	48
9.1	Blokové schéma merania optických komponentov priamou metódou. .	49
9.2	Referencia laseru a power metra pred meraním. . . . .	50
9.3	Schéma meraného deliča výkonu 7265887. . . . .	52
9.4	Schéma meraného deliča výkonu 72658807. . . . .	53
9.5	Schéma meraného deliča výkonu A160022695. . . . .	55
9.6	Schéma meraného deliča výkonu A160022688. . . . .	57
9.7	Schéma meraného deliča výkonu 17012588. . . . .	59

9.8	Schéma meraného deliča výkonu 72658742. . . . .	61
9.9	Schéma meraného deliča výkonu A140062957. . . . .	62
9.10	Schéma meraného cirkulátoru A16000037, 18040064 a 18040004. . . .	64
9.11	Schéma meraného cirkulátoru A15069358. . . . .	64
9.12	Schéma meraného izolátoru 19072181, 19072455 a 16004052. . . . .	69
9.13	Metóda merania šírky pásma laseru [13]. . . . .	70
9.14	Fázový šum laserovej diódy LD100. . . . .	71
9.15	Šírka pásma laserovej diódy LD100. . . . .	71
9.16	Frekvencia v čase pri laserovej dióde LD100. . . . .	71

## ZOZNAM TABULIEK

9.1	Namerané hodnoty SN: 72658887 s referenciou -9,1 dBm. . . . .	51
9.2	Namerané parametre SN: 72658887 s referenciou -7,7 dBm. . . . .	51
9.3	Namerané parametre SN: 72658807 s referenciou -9,1 dBm. . . . .	52
9.4	Namerané parametre SN: 72658807 s referenciou -7,7 dBm. . . . .	53
9.5	Namerané parametre SN: A160022695 s referenciou -9,1 dBm. . . . .	55
9.6	Namerané parametre SN: A160022695 s referenciou -7,7 dBm. . . . .	55
9.7	Namerané parametre SN: A160022688 s referenciou -9,1 dBm. . . . .	56
9.8	Namerané parametre SN: A160022688 s referenciou -7,7 dBm. . . . .	56
9.9	Namerané parametre SN: 17012588 s referenciou -9,1 dBm. . . . .	58
9.10	Namerané parametre SN: 17012588 s referenciou -7,7 dBm. . . . .	58
9.11	Namerané parametre SN: 72658742 s referenciou -9,1 dBm. . . . .	60
9.12	Namerané parametre SN: 72658742 s referenciou -7,7 dBm. . . . .	60
9.13	Namerané parametre SN: A140062957 s referenciou -9,1 dBm. . . . .	61
9.14	Namerané parametre SN: A140062957 s referenciou -7,7 dBm. . . . .	62
9.15	Namerané parametre SN: A16000037 s referenciou -9,1 dBm. Katalógová hodnota v zátvorke. . . . .	63
9.16	Namerané parametre SN: A16000037 s referenciou -7,7 dBm. Katalógová hodnota v zátvorke. . . . .	63
9.17	Namerané parametre SN: 18040064 s referenciou -9,1 dBm. Katalógová hodnota v zátvorke. . . . .	64
9.18	Namerané parametre SN: 18040064 s referenciou -7,7 dBm. Katalógová hodnota v zátvorke. . . . .	65
9.19	Namerané parametre SN: 18040004 s referenciou -9,1 dBm. Katalógová hodnota v zátvorke. . . . .	65
9.20	Namerané parametre SN: 18040004 s referenciou -7,7 dBm. Katalógová hodnota v zátvorke. . . . .	66
9.21	Namerané parametre SN: A15069358 s referenciou -9,1 dBm. Katalógová hodnota v zátvorke. . . . .	66
9.22	Namerané parametre SN: A15069358 s referenciou -7,7 dBm. Katalógová hodnota v zátvorke. . . . .	67
9.23	Namerané parametre SN: 16004052 s referenciou -9,1 dBm. Katalógová hodnota v zátvorke. . . . .	67
9.24	Namerané parametre SN: 16004052 s referenciou -7,7 dBm. Katalógová hodnota v zátvorke. . . . .	67
9.25	Namerané parametre SN: 19072455 s referenciou -9,1 dBm. Katalógová hodnota v zátvorke. . . . .	68



9.26	Namerané parametre SN: 19072455 s referenciou -7,7 dBm. Katalógová hodnota v zátvorke. . . . .	68
9.27	Namerané parametre SN: 19072181 s referenciou -9,1 dBm. Katalógová hodnota v zátvorke. . . . .	68
9.28	Namerané parametre SN: 19072181 s referenciou -7,7 dBm. Katalógová hodnota v zátvorke. . . . .	68

# ÚVOD

Optické a optoelektronické komponenty sú súčiastky, ktoré pracujú s optickými signálmi. V optických sieťach sa signál šíri pomocou svetla v sklenenom vlákne. Ich hlavnou výhodou je necitlivosť na elektrické rušenie. Optoelektronické komponenty sú komponenty, ktoré vyžarujú svetlo alebo naň reagujú. Patria medzi ne napríklad luminiscenčná dióda, laserová dióda, fotodiódy, rôzne indikátory, žiariče, detektory alebo optočleny. Optoelektronické zariadenia majú širokú škálu použitia ako je komunikácia na optickom vlákne, laserová technológia, optická metrológia atď. Je zväčša založená na polovodičových materiáloch. Pre každú súčiastku boli dané základné parametre merania, podľa ktorých je možné určiť kvalitu súčiastky. Jedná sa napríklad o veľkosť útlmu, budiaci prúd, výkon, odpor súčiastky atď. Dnes už je na trhu veľké množstvo optických aj optoelektronických komponentov od rôznych výrobcov a firiem. Nie všetky sú kvalitné a splňajú naše požiadavky. V práci boli zvolené tri optické a tri optoelektronické súčiastky. Z optických to sú pasívne deliče výkonu, izolátory a cirkulátory. Z optoelektronických sú to laserová dióda, fotodetektor a modulátor. V práci boli zvolené štyri typy komponentov u ktorých boli premerané parametre súčiastky. Sú to deliče výkonu, izolátory, cirkulátory a laserová dióda. Výsledky boli porovnané s katalógovými hodnotami, ktoré výrobcovia uvádzajú na svojich stránkach.

# 1 OPTICKÉ KOMPONENTY

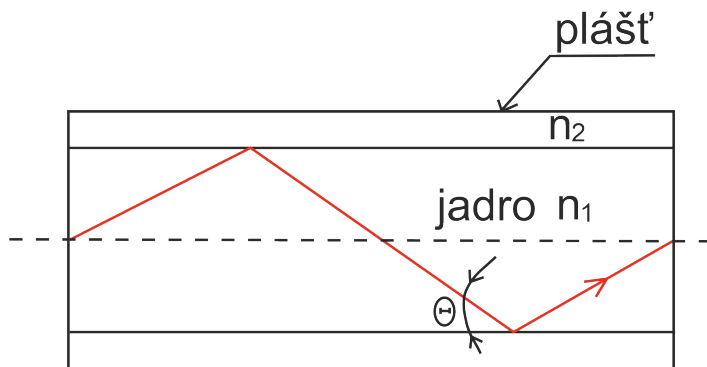
Optické žiarenie sa berie od 100 nm do 1 mm a rozdeľuje sa do oblastí :

1. ultrafialová 100 nm až 380 nm,
2. svetelná 380 nm až 780 nm,
3. infračervená 780 nm až 1 mm.

Pre optickú komunikáciu je možné považovať infračervenú oblasť, pre ktorú existujú výkonné lasery a detektory [1]. Pre minimálny útlm materiálov, používaných na výrobu svetlovodov je dôležitá oblasť okolo  $0,4 \mu\text{m}$  až  $1,7 \mu\text{m}$ . V ultrafialovej oblasti je obťažne vybudieť žiarenie s tak vysokou energiou svetelných kvánt. V infračervenej oblasti je hlavný problém malá odolnosť prijímačov proti rušivým signálom [1].

Pri prechode informácií optickým svetlovodom sa parametre optického signálu menia. Mení sa tvar prenášaných impulzov, dochádza k zoslabeniu signálu, prípadne časovému posunutiu. Pre zlepšenie dosahu je možné použiť opakovače. Pri zosilovacích opakovačoch sa signál zosiluje napríklad laserovým zosilňovačom. Nevýhodou je zvýšenie šumu pri každom zosilnení, z čoho vyplýva zhoršenie kvality s rastúcou dĺžkou trasy. Regeneračné opakovače obnovujú pri každom zosilnení pôvodnú kvalitu. Ich kvalita je nezávislá na dĺžke trasy [1].

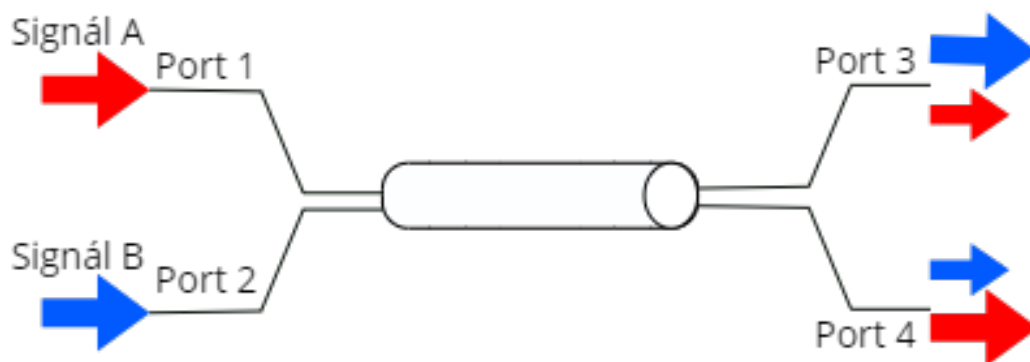
Pri optickom prenose je nosičom informácie žiarenie. Vzniká pri ňom šum, ktorý je súčasťou optického signálu. Optický prenos je založený na totálnom odraze na rozhraní dvoch optických prostredí, ktoré majú rozdielny index lomu. Sú tvorené valcovým jadrom s indexom lomu  $n_1$ , okolo ktorého je plášť s indexom lomu  $n_2$ . Platí  $n_1 > n_2$ , kde lúče vstupujú do jadra pod uhlom menším než  $\Theta$ , kde  $\cos \Theta = n_2/n_1$ , dochádza na rozhraní jadra a plášte k totálnemu odrazu (obrázok 1.1) [1].



Obr. 1.1: Prenos svetlovodom [1].

## 2 DELIČ VÝKONU

Vláknové optické deliče slúžia k rozdeleniu vstupných signálov na dva a viac výstupov [2]. Zariadenie je schopné kombinovať dva alebo viac vstupov do jedného výstupu a tiež rozdeliť jeden vstup na dva alebo viac výstupov [3]. Schéma základného deliča výkonu je tzv. T križovatka, ktorá je na obrázku 2.1.



Obr. 2.1: Schéma optického deliča výkonu [2].

Svetlo zo vstupného vlákna sa môže objaviť na jednom alebo viacerých výstupoch. Delič výkonu je obvykle smerový optický člen, čo znamená, že žiadny optický výkon vysielaný do niektorého výstupného portu sa nemôže vrátiť späť do jedného zo vstupných portov. Často existuje špecifikácia straty spätného toku, ktorá ukazuje, o koľko je slabšie spätné odrazené svetlo v porovnaní so vstupom. V prípade, že všetky vlákna sú v jednovírovom režime (to znamená, že podporujú iba jeden režim na jeden smer polarizácie pre danú vlnovú dĺžku), existujú určité fyzické obmedzenia deliča výkonu. Nie je možné kombinovať dva alebo viac vstupov s rovnakou optickou frekvenciou do výstupu s jednoduchou polarizáciou bez výrazných strát. Obmedzenie strát je možné v prípade, že dva vstupy, ktoré sa majú kombinovať sú vzájomne koherentné. Toto obmedzenie však neplatí pri rôznych vstupných vlnových dĺžkach. Deliče výkonu citlivé na vlnovú dĺžku sa používajú ako multiplexori v telekomunikačných systémoch s delením vlnových dĺžok (WDM) na kombinovanie alebo oddelenie kanálov s rôznymi vlnovými dĺžkami [3]. Väčšina deličov výkonu pracuje v obmedzenom rozsahu vlnových dĺžok (obmedzené šírka pásma), pretože deliče výkonu sú závislé od vlnovej dĺžky a často aj od polarizácie [3].

## 2.1 Typy deličov výkonu

Typy optických deličov výkonu [2]:

1. Y delič výkonu – tento typ deliča výkonu jednoducho rozdeľuje signál na dva výstupy. Pomer distribúcie energie medzi dvoma výstupmi sa dá presne regulovať, napríklad 90/10 percent, 80/20 percent, 70/30 percent, 60/40 percent alebo 50/50 percent.
2. T delič výkonu – delič T funguje rovnako ako delič Y. T deliče môžu byť kaskádové na pripojenie viacerých terminálov v sieti.
3. Hviezdicové spojky – majú viac vstupov a výstupov. Rovnomerne rozdeľujú vstupný výkon medzi výstupné vlákna. Pre siete s viac ako tromi alebo štyrmi terminálmi, má použitie hviezdicového deliča výkonu väčšiu výhodu, kvôli jeho nižšej strate, namiesto kaskádového T deliča výkonu.
4. Stromové deliče – berú jeden alebo dva vstupy a rozdeľia ich na viac výstupov. Stromové deliče rozdeľujú vstupný výkon rovnomerne medzi výstupné vlákna. Môžu rozdeľovať jeden vstup do viacerých výstupov alebo spájať viaceré vstupy do jedného výstupu.

## 2.2 Základné parametre

**Deliaci pomer** – pomer podľa ktorého je vstupný optický výkon rozdelený medzi výstupy. Jednotka [%] [4].

**Strata vloženia** – strata vloženého signálu musí byť čo najmenšia. Jednotka [dB] [4].

**Nadmerná strata vloženia** – je určená pomerom celkového vstupného výkonu k celkovému výstupnému výkonu. Jednotka [dB] [4].

**Vlnová dĺžka signálu** – vlnová dĺžka pre ktorú je delič výkonu určený a pri ktorej dosahuje minimálne straty vloženia a čo najpresnejší deliaci pomer. Jednotka [nm] [2].

**Strata závislá na polarizácii** – je definovaná ako pomer maximálneho a minimálneho prenosu v dôsledku stavov polarizácie. Dá sa vypočítať podľa nasledujúceho vzorca. Jednotka [dB] [4].

$$PDL = 10 \log \frac{P_{max}}{P_{min}}. \quad (2.1)$$

## 2.3 Využitie deliča výkonu

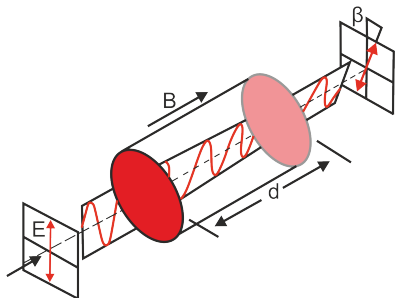
Použitie optických deličov má mnoho výhod. Majú nízku nadmernú stratu, vysokú stabilitu, vysokú spoľahlivosť a nízku stratu v závislosti na polarizácii. Majú tiež vysokú smerovosť a nízke straty vloženia. Mnoho aplikácií využíva optické deliče, ako sú komunitné anténne siete a optické komunikačné systémy. [5].

### 3 IZOLÁTOR

Optický izolátor je pasívne magneto-optické zariadenie, ktoré umožňuje, aby svetlo bolo transportované len jedným smerom. Izolátory sa používajú na ochranu zdroja pred spätnými odrazmi alebo signálmi, ktoré sa môžu vyskytnúť v izolátore [6]. Spätné odrazy by mohli poškodiť laserový zdroj alebo spôsobiť jeho skok, modulovať amplitúdu alebo spôsobiť posun frekvencie. Vo vysokovýkonných aplikáciách môžu spätné odrazy spôsobiť nestability a prudké zvýšenie výkonu. Funkcia izolátora je založená na faradayovom efekte (obrázok 3.1). V roku 1842 Michael Faraday zistil, že rovina polarizovaného svetla rotuje pri prenose cez sklo (alebo iné materiály), ktorá je vystavená magnetickému poľu. Smer otáčania závisí od smeru magnetického poľa a nie od smeru šírenia svetla, rotácia teda nie je recipročná [7]. Miera rotácie polarizačnej roviny je priamo úmerná dráhe  $d$ , po ktorej sa svetlo v danom prostredí šíri, vektoru magnetickej indukcie  $B$  v smere šírenia svetla. Veľkosť uhlu rotácie  $\beta$ , o ktorý sa rovina polarizácie otočí, môžeme vypočítať zo vzťahu [8]

$$\beta = VBd, \quad (3.1)$$

kde koeficient úmernosti  $V$  je takzvaná verdetova konštanta, charakteristika pre dané prostredie (materiálová charakteristika). Verdetova konštanta je závislá na vlnovej dĺžke svetla. Materiály, ktoré majú veľmi vysokú hodnotu Verdetovej konštanty (napr. terbium-galium-granát, TGG je  $V = -40 \text{ rad} \cdot T^{-1} \cdot m^{-1}$ ), je možné využiť v zaujímavých vedecko-technických aplikáciách [8].



Obr. 3.1: Účinok Faradayovho rotátora na lineárne polarizované svetlo [8].

Optický izolátor sa skladá zo vstupného polarizátora, Faradayovho rotátora s magnetom a výstupného polarizátora. Vstupný polarizátor funguje ako filter, ktorý umožňuje prenos iba lineárne polarizovaného svetla do Faradayovho rotátora. Faradayov rotátor otočí polarizáciu vstupného svetla o uhol 45 stupňov. Výstupné svetlo je otočené vzhľadom na vstupný signál o 45 stupňov. V opačnom smere Faradayov rotátor pokračuje v rotácii polarizovaného svetla v rovnakom smere ako

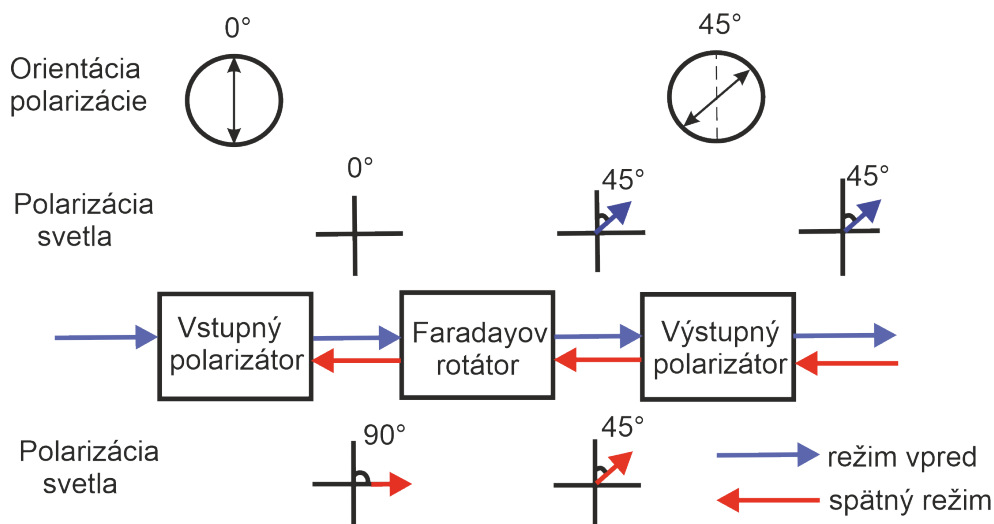
predtým, takže polarizované svetlo je teraz otočené už o 90 stupňov, vzhľadom na vstupný signál. Tento signál polarizátor odfiltruje, buď odrazom alebo absorpciou v závislosti od typu polarizátora. Faradayovmu optickému izolátoru sa môže hovoriť aj optická dióda [6].

### 3.1 Delenie izolátorov

Podľa závislosti izolátora na polarizácii delíme izolátory na [7]:

1. Izolátory závislé od polarizácie 3.2 – predpokladá sa že os vstupného polarizátora je vertikálna. Laserové svetlo, polarizované alebo nepolarizované, vstupuje do vstupného polarizátora a stáva sa vertikálne polarizované. Faradayov rotátor otočí rovinu polarizácie o  $45^\circ$  v smere šírenia. Nakoniec svetlo opúšťa výstupný polarizátor.

Svetlo reverzného režimu, ktoré sa pohybuje späť cez izolátor, najskôr vstúpi do výstupného polarizátora. Ten polarizuje svetlo o  $45^\circ$  vzhľadom na vstupný polarizátor. Potom prechádza cez rotačnú tyč Faradayovho rotátora a polarizačná rovina sa otočí o ďalších  $45^\circ$  v smere šírenia. To má za následok rotáciu roviny o  $90^\circ$  vzhľadom na vstupný polarizátor. Polarizačná rovina je kolmá na prenosovú os vstupného polarizátora. Toto svetlo bude následne vyfiltrované.



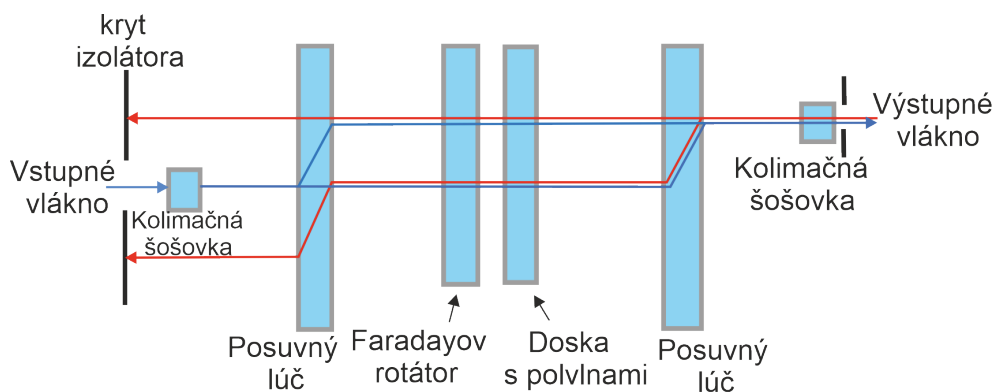
Obr. 3.2: Izolátor závislí na polarizácii [7].

2. Izolátory nezávislé od polarizácie 3.3 – prichádzajúce svetlo je rozdelené do dvoch vetiev dvojlomným kryštálom. Faradayov rotátor a doska s polvlnami otáčajú každú vetvu polarizácie skôr, ako narazia na druhý dvojlomný kryštál,



ktorý je usporiadaný tak, aby znovu spojil dva lúče.

Svetlo spätného odrazu v reverznom režime sa stretne s druhým dvojlomným kryštálom a rozdelí lúč na dva lúče s polarizáciou zarovnanou so svetlom v režime šírenia. Faradayov rotátor je nerecipročný, takže vyruší rotáciu zavedenú doskou s polvlnami pre svetlo v opačnom smere. Keď svetlo narazí na dvojlomový posuvný lúč, bude odklonený od kolimačnej šošovky do stien tela izolátora, čím sa zabráni vstupu reverzného režimu do vstupného vlákna.

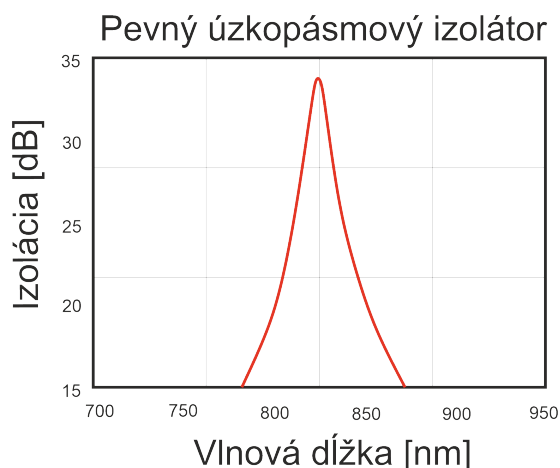


Obr. 3.3: Izolátor nezávislí na polarizácii [7].

Izolátory závislé na polarizácii delíme podľa šírky pásma na [7]:

1. Pevný úzkopásmový izolátor – izolátor je nastavený na  $45^\circ$  rotácie pri projektovanej vlnovej dĺžke. Polarizátory sú pevné a sú nastavené tak, aby poskytovali maximálnu izoláciu pri projektovanej vlnovej dĺžke. Keď sa mení vlnová dĺžka, izolácia klesá. Vlastnosti:
  - pevné prvky rotátora, pevné polarizátory,
  - závislosť na polarizácii,
  - najmenší a najmenej drahý typ izolátora,
  - žiadne ladenie.

Charakteristika pevného úzkopásmového izolátora je na obrázku 3.4.

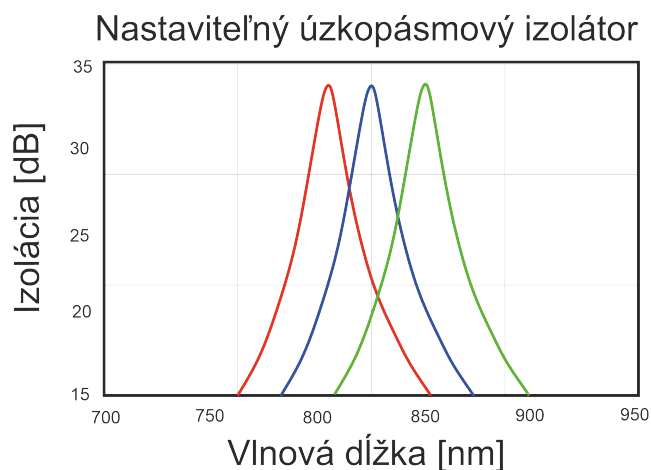


Obr. 3.4: Charakteristika pevného úzkopásmového izolátora [7].

2. Nastaviteľný úzkopásmový izolátor – izolátor je nastavený na  $45^\circ$  rotácie pri projektovanej vlnovej dĺžke. Ak sa zmení vlnová dĺžka použitia, zmení sa Faradayova rotácia, čím sa zníži aj izolácia. Aby sa získala maximálna izolácia, výstupný polarizátor sa môže otočiť, aby sa mu znova vycentrovala izolačná krivka. Tato rotácia spôsobuje straty prenosu v smere šírenia, ktoré sa zvyšujú s rastúcim rozdielom medzi použitou a návrhovou vlnovou dĺžkou. Vlastnosti:

- pevné prvky rotátora, nastaviteľné polarizátory,
- závislosť na polarizácii,
- univerzálny izolátor.

Charakteristika nastaviteľného úzkopásmového izolátora je na obrázku 3.5.



Obr. 3.5: Charakteristika nastaviteľného úzkopásmového izolátora [7].

3. Pevný širokopásmový izolátor – 45 stupňový Faradayov rotátor je spojený so 45 stupňovým kryštálovým kremenným rotátorom, aby na výstupe vytvoril kombinovanú 90 stupňovú rotáciu. Závislosť vlnových dĺžok dvoch materiálov rotátora spoločne vytvárajú profil izolátoru s plochým povrchom. Izolátor nevyžaduje žiadne ladenie alebo nastavenie činnosti v rámci určenej projektovej šírky pásma. Vlastnosti:

- pevné prvky rotátora, pevné polarizátory,
- závislosť na polarizácii,
- najväčšia šírka pásma izolácie,
- nevyžaduje žiadne ladenie.

Charakteristika pevného širokopásmového izolátora je na obrázku 3.6.

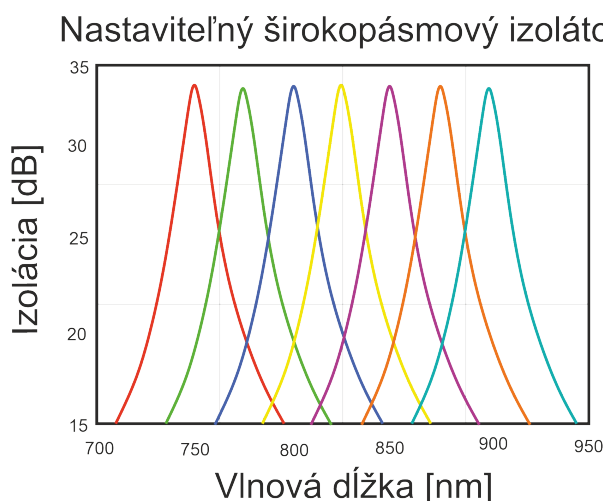


Obr. 3.6: Charakteristika pevného širokopásmového izolátora [7].

4. Nastaviteľný širokopásmový izolátor – izolátor je nastavený na 45 stupňovú rotáciu pri návrhovej vlnovej dĺžke. Na izolátore je ladiaci krúžok, ktorý upravuje množstvo materiálu Faradayovho rotátora vloženého do vnútorného magnetu. Ak sa vlnová dĺžka pri používaní mení, mení sa aj rotácia Faradayovho rotátora a izolácia sa znižuje. Na získanie maximálnej izolácie sa nastavovací krúžok nastaví tak, aby sa dosiahlo 45 stupňovej rotácie potrebnej pre maximálnu izoláciu. Vlastnosti:

- nastaviteľný prvok rotátora, pevné polarizátory,
- závislosť na polarizácii,
- jednoduché ladenie,
- širší rozsah ladenia ako pri nastaviteľných úzkopásmových izolátoroch.

Charakteristika nastaviteľného širokopásmového izolátora je na obrázku 3.7.

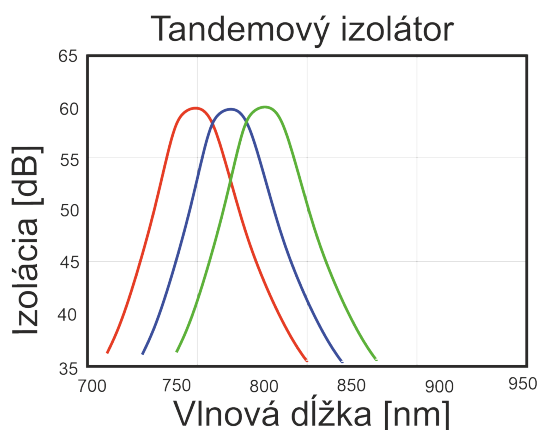


Obr. 3.7: Charakteristika nastaviteľného širokopásmového izolátora [7].

5. Tandemové izolátory – skladajú sa z dvoch Faradayových rotátorov v sérii, ktoré zdieľajú jeden centrálny polarizátor. Pretože sa rotátory navzájom rušia, rotácia siete na výstupe je  $0^\circ$ . Vlastnosti:

- izolácia do 60 dB,
- závislosť na polarizácii,
- najvyššia izolácia,
- pevné alebo nastaviteľné.

Charakteristika tandemového izolátora je na obrázku 3.8.



Obr. 3.8: Charakteristika pevného úzkopásmového izolátora [7].

## 3.2 Základné parametre

**Izolácia** – je dôležitým faktorom pri špecifikovaní kvality izolátora. Izolácia je meraná v dB. Izolácia udáva oddelenie úrovni signálu na susedných portoch zariadenia. Čím väčšia je hodnota izolácie, tým menšie je rušenie na jednotlivých portoch.

**Strata vloženia** – je dôležité aby pri prenose signálu nastávala minimálna strata pri vložení prenášaného signálu. Strata signálu je významnejšia pre vyššie frekvencie. Jednotka [dB].

**Výkon** – je úroveň energie, ktorú zariadenie dokáže zvládnuť pri zachovaní svojich elektrických charakteristík. Jednotka [W].

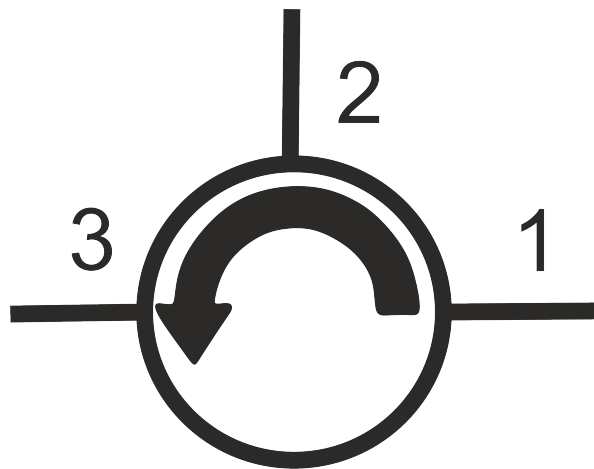
**Stredná vlnová dĺžka** – určuje vlnovú dĺžku, na ktorej izolátor pracuje, pričom je dodržaná maximálna izolácia a minimálna strata vloženia. Jednotka [nm] [9].

## 3.3 Využitie optického izolátora

Optické izolátory sa používajú v mnohých aplikáciách, napríklad laserových aplikáciách na zabránenie nechcenej spätnej väzby do laserového zdroja. To pomáha pri neovplyvňovaní koherencie lasera, ktoré spôsobuje akokoľvek poškodenie samotnej diódy, pretože spätná väzba je schopná frekvenčného posunu, šumu, skokového režimu alebo kolísania amplitúdy. Je teda kľúčovým zariadením na dosiahnutie stabilnej prevádzky laserovej diódy. Vo vysokorýchlostných zosilňovačoch a trasách prenosu optického vlákna sa považujú za nevyhnutné zariadenie kvôli svojej schopnosti eliminovať nepriaznivý účinok spätných lúčov [10].

## 4 CIRKULÁTOR

Cirkulátor je optické pasívne zariadenie, ktoré sa používa na zlúčenie alebo delenie optického signálu na rovnakej vlnovej dĺžke na základe smeru šírenia. Optický signál, ktorý prichádza na vstupný port cirkulátoru je smerovaný na druhý port s minimálnym útlom. Optický signál, ktorý prišiel na druhý port je smerovaný na tretí port (obrázok 4.1). V prípade viacportového cirkulátoru je signál smerovaný z tretieho portu na štvrtý port a tak ďalej. Táto akcia zabráni šíreniu signálu v nechcenom smere [11].



Obr. 4.1: Funkcia optického cirkulátora [12].

Je založený na využití polarizačnej rotácie optického signálu - Faradayovho javu. Optický obehový systém obsahuje komponenty Faradayovho rotátora, dvojlomného kryštálu, vlnovej doštičky a lúča posunu. Faradayov rotátor využíva Faradayov efekt, čo je jav, kde polarizačná rovina elektromagnetickej (svetelnej) vlny sa otáča v materiáli pod magnetickým polom aplikovaným rovnobežne so smerom šírenia svetelnej vlny. Šírenie svetla v dvojlomnom kryštáli závisí od stavu polarizácie svetelného lúča a relatívnej orientácie kryštálu. Polarita lúča môže byť zmenená alebo lúč môže byť rozdelený na dva lúče s ortogonálnymi stavmi polarizácie. Vlnová doska a posunovač lúčov sú dve rozdielne formy dvojlomného kryštálu. Vlnová doska sa môže vyrobiť rezaním dvojlomného kryštálu do určitej orientácie tak, že optická os kryštálu je v rovine dopadu a je rovnobežná s hranicou kryštál. Prúdový lúč sa používa na rozdelenie prichádzajúceho lúča na dva lúče s ortogonálnymi stavmi polarizácie [12].

## 4.1 Delenie optických cirkulátorov

Podľa polarizácie delíme optický cirkulátor na:

1. Optický cirkulátor závislý na polarizácii – používa sa pre svetlo s konkrétnym stavom polarizácie.
2. Optický cirkulátor nezávislý na polarizácii – neobmedzuje sa iba na stav polarizácie svetla. Väčšina optických cirkulátorov používaných pri komunikácii na optických vláknach je navrhnutá tak, aby boli nezávislé od polarizácie.

Podľa funkčnosti rozdeľujeme cirkulátor na:

1. Plne obehový systém – používa všetky porty v úplnom kruhu. Svetlo prechádza z portu 1 do portu 2, z portu 2 do portu 3 a späť do portu 1.
2. Kvázi-obehový – svetlo prechádza cez všetky porty postupne, ale svetlo z posledného portu je stratené a nedá sa preniesť späť na prvý port. Pre väčšinu aplikácií stačí kvázi-obehový cirkulátor.

## 4.2 Základné parametre

Pri výbere vysokofrekvenčného cirkulátora je dôležité poznať parametre, ktoré ho špecifikujú, ako napríklad:

**Stredná vlnová dĺžka** – vlnový rozsah, na ktorých cirkulátor môže pracovať. Jednotka [nm].

**Výkon** – úroveň energie, ktorú môže cirkulátor dosiahnuť pri zachovaní svojich elektrických charakteristík. Jednotka [W].

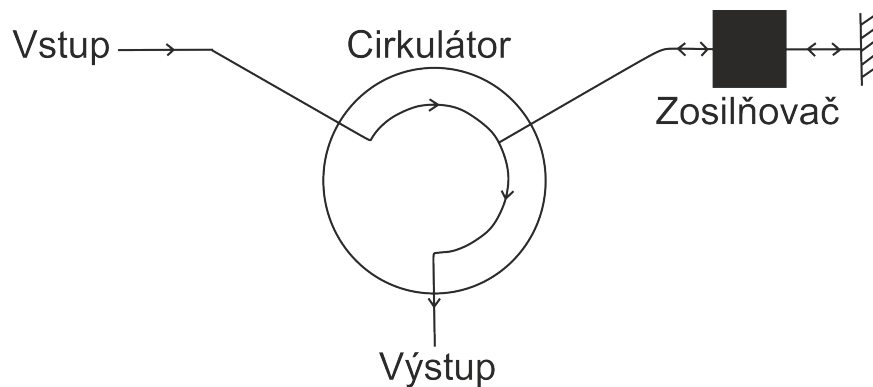
**Izolácia** – miera hladín signálu na susedných portoch cirkulátoru. Izolácia sa meria medzi jednotlivými portami. Čím vyššia je hodnota izolácie, tým je lepší výkon cirkulátora. Jednotka [dB].

**Strata vloženia** – strata energie dopadajúceho signálu z jedného portu na druhý. Je to rozdiel v dopadajúcej energii na jeden port a veľkosti prijatej energie na ďalšom porte. Jednotka [dB] [9].

**Presluch** – signál prenášaný na jednom porte spôsobuje nežiadúci účinok na druhom porte. Pri optickom cirkulátore presluch vzniká medzi portom 1 a portom 3.

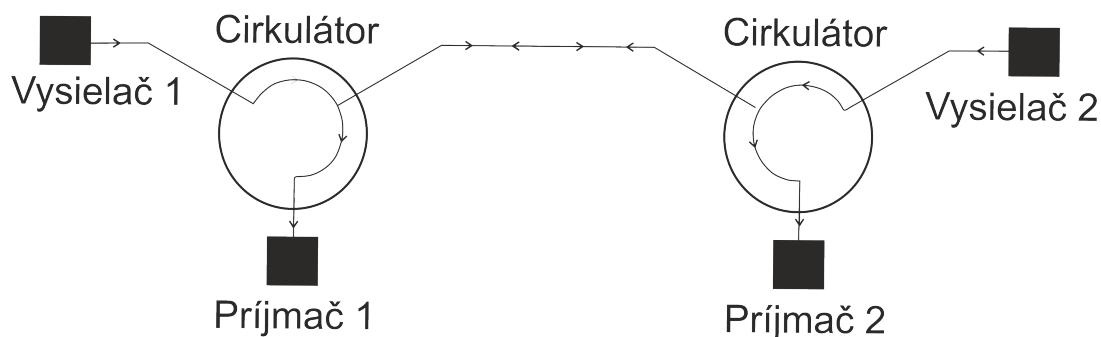
## 4.3 Využitie cirkulátora

Aplikácia optického cirkulátora ako zosilňovač EDFA na zosilnenie signálu. Konfigurácia pomocou trojportového optického cirkulátora je znázornená na obrázku 4.2.



Obr. 4.2: Zosilňovací systém tvorený cirkulátorom [12].

Najčastejšie sa optický cirkulátor používa v trojportovej verzii v rôznych meracích prístrojoch a systémoch WDM a DWDM. Pre prenos informácií na optických vláknach, keď je potreba ušetriť jedno optické vlákno, môžeme využiť optický cirkulátor, na oboch stranách komunikačného kanálu. Z dvoch štandardných optických vlákien, umožní cirkulátor aplikáciu len jedného optického vlákna (obrázok 4.3). Pretože prenosový systém používa rovnakú vlnovú dĺžku na oboch stranách linky, je nutné zaručiť minimálne odrazy na konektoroch a spojoch linky [12].



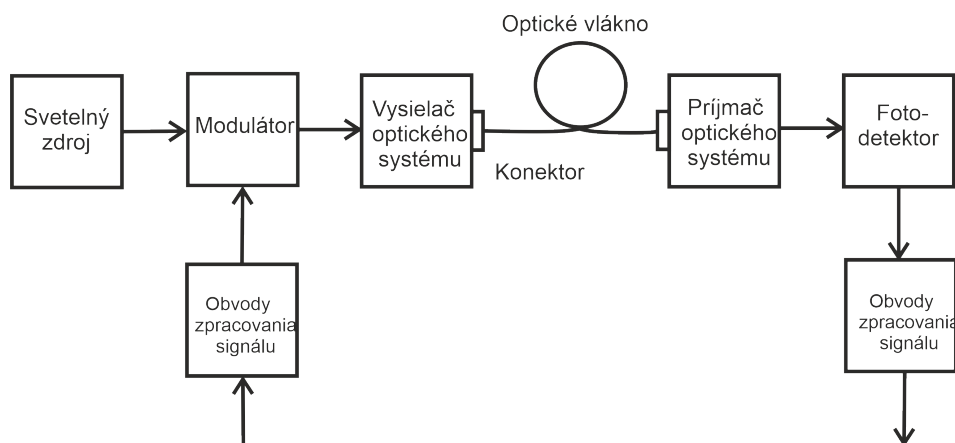
Obr. 4.3: Duplexný vysielač/príjmací systém [12].



## 5 OPTO-ELEKTRICKÉ KOMPONENTY

Prenos informácie svetelným lúčom sa zakladá na odlišnosti medzi elektrickým a svetelným signálom. Pri elektrickom signále sú nositeľmi signálu nabité elektróny, zatiaľ čo pri optickom signále sú to neutrálne fotóny, ktoré vzájomne na seba nepôsobia. Z tohto dôvodu pri prenose optickým vláknom nevznikajú žiadne elektrické ani magnetické polia, ktoré sú častým problémom parazitných väzieb v elektrických obvodoch [1].

Optický spoj je v základe tvorený modulovaným zdrojom žiarenia, optickým prostredím a prijímačom žiarenia. Svetelným zdrojom býva najčastejšie laser alebo luminiscenčná dióda. Žiarenie sa moduluje v optickom modulátore alebo v prípade polovodičového zdroja priamou zmenou budiaceho prúdu. Vysielacia časť prevedie elektrický signál na svetelný s čo najmenšími stratami do optického prostredia (optického vlákna). Prijímacia strana privedie signál na fotodetektor a následne sa signál prevedie späť na elektrický, pričom prijímač musí zaistiť optimálne spracovanie vzhľadom k pomeru signál – šum. Základné zapojenie optického spoja je vidieť na obrázku 5.1 [1].



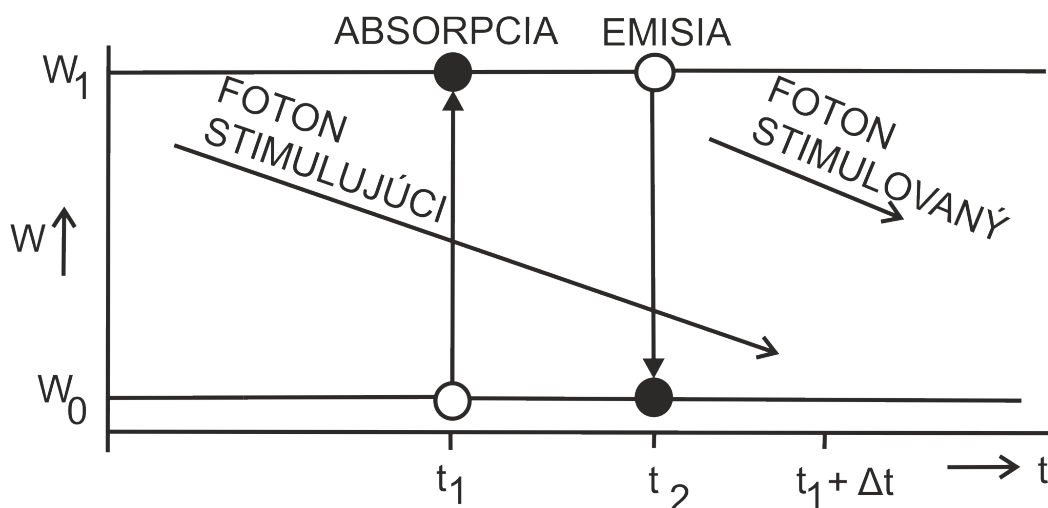
Obr. 5.1: Základné zapojenie optického spoja [1].

V optických spojoch sa najčastejšie používajú ako svetelné zdroje lasery a luminiscenčné diódy (LED). LED sú zdrojom nekoherentného žiarenia a používajú sa pre spoje s nižšími nárokmi na šírku pásma a dosah. Ako zdroj koherentného svetla sú najvýhodnejšie laserové diódy. Pre výber fotodetektoru je dôležitá úroveň užitočného signálu a veľkosť šumu na výstupe fotodetektoru. Najvýhodnejšími sú polovodičové fotodiódy typu PIN alebo lavínové fotodiódy (LFD) [1].

## 6 LASEROVÁ DIÓDA

Polovodičové laserové diódy sú kľúčovými komponentami v optickej komunikácii, v ukladaní údajov, v snímaní, v spracovávaní materiálov a v ďalších aplikáciach. Sú založené na interakciách elektrónov a fotónov v polovodičových nanoštruktúrach. Optické žiarenie, ktoré je generované laserom sa sústreďuje do veľmi úzkeho intervalu vlnových dĺžok. Laserové žiarenie je do veľkej miery koherentné a laser sa vyznačuje vysokou žiarivosťou a malou rozbiehavosťou laserového zväzku. Základnou funkciou všetkých laserových diód je stimulovaná emisia (obr. 6.1). V polovodičových kryštáloch sú aktívne atómy husto vedľa seba a žiarivé prechody sa neuskutočňujú medzi energetickými diskretnými hladinami ale uskutočňujú sa medzi energetickými pásmi. Elektróny obsadzujú najnižšie energetické hladiny vo vodivom pásme až po Fermiho kvazihladinu pre elektróny  $E_{fn}$ . Stavby vo valenčnom pásme sú bez elektrónov až po Fermiho kvazihladinu pre diery  $E_{fp}$ . Pri dopade fotónu na polovodič s energiou väčšou než  $E_g$  (šírka zakázaného pásu v [eV]), a zároveň menšiou než  $E_{fn} - E_{fp}$ , nemôže dôjsť k jeho absorpcii, pretože hladiny na ktorých by sa mohol uskutočniť prechod spojený s pohltitím fotónu, sú už obsadené. Dopadajúce fotóny teda môžu stimulovať prechody elektrónov z vodivého do valenčného pásu s následnou emisiiu nerozdeliteľných fotónov do budiacich [14]. Podmienka pre ich stimuláciu je:

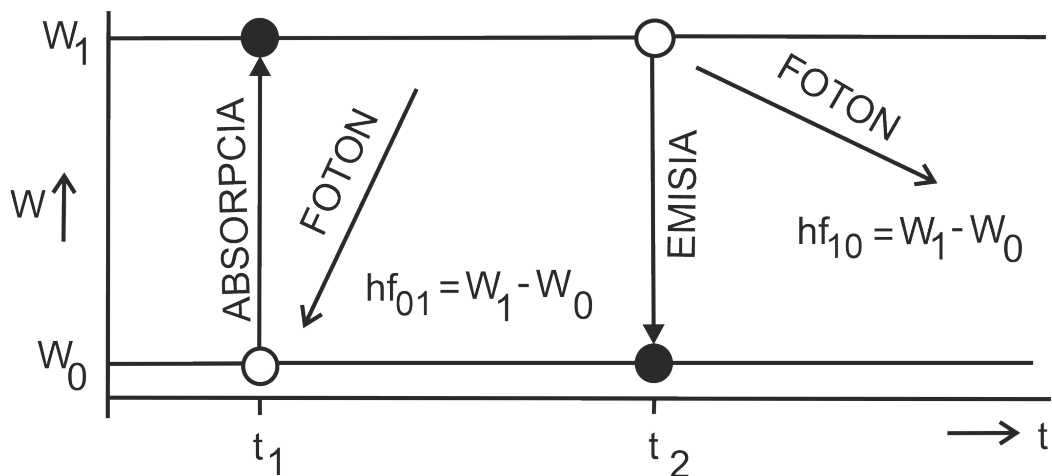
$$E_g < h\nu < E_{fn} - E_{fp}.$$



Obr. 6.1: Stimulovaná emisia fotónov [14].

Ku generovaniu optického žiarenia dochádza z dôsledku zavedenia kladnej spätnej

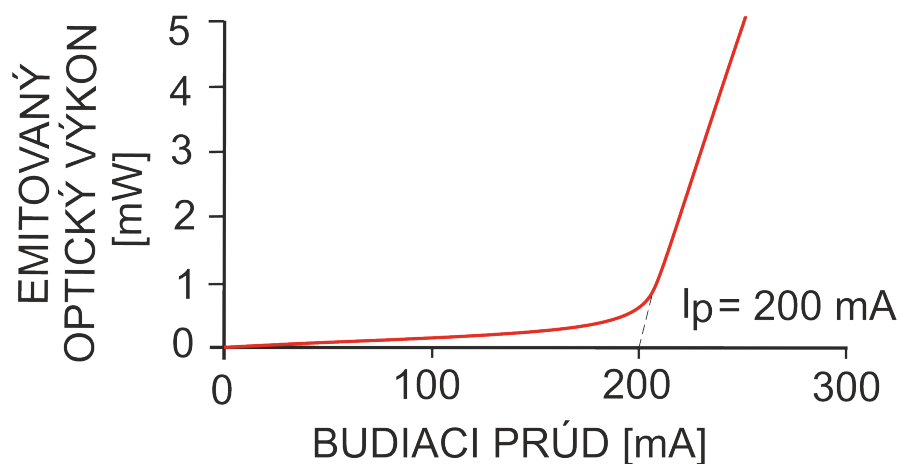
väzby, ktorá časť zosilneného signálu z výstupu privedie na vstup. K tomuto účelu sa používajú rôzne typy rezonátorov, selektívnych odražačov alebo rozloženej spätnej väzby. V súčasnosti je najpoužívanejším rezonátorom v laserových diódach Fabry-Parotov rezonátor [14]. Vzhľadom nato, že pomerný index lomu rozhrania polovodičový kryštál a vzduch má pomerne vysokú hodnotu (pre GaAs je  $n_r = 3,34$ ) nemusia sa u injekčných laserových diód používať špeciálne zrkadlá, stačí využiť odrazu elektromagnetickej vlny od rozhrania. Podmienkou realizácie takéhoto rezonátoru je potom vzájomná rovnobežnosť dvoch protiľahlých stien polovodičového laseru a ich kolmosť k rovine prechodu PN. V kubických kryštáloch sa zrkadlá rezonátoru získavajú štiepaním orientovaných polovodičových dosťičiek s prechodom PN pozdĺž kryštalografických rovín. Pri nízkych prúdoch pretekajúcich cez prechod PN v priamom smere dochádza ku generovaniu spontánneho žiarenia šíriaceho sa vo všetkých smeroch s náhodnou fázou. Rast prúdu zvyšuje rýchlosť žiarivej kombinácie, čo vedie k rastu hustoty fotónového toku. Generované fotóny stimulujú ďalšiu rekombináciu. Vzhľadom k tomu že najvyšší počet generovaných fotónov má energiu rovnú energii maxima spektrálneho rozdelenia spontánnej emisie (obr. 6.2), nastáva pre túto energiu najviac vynútených prechodov v porovnaní s inými oblasťami spektrálneho rozdelenia [14].



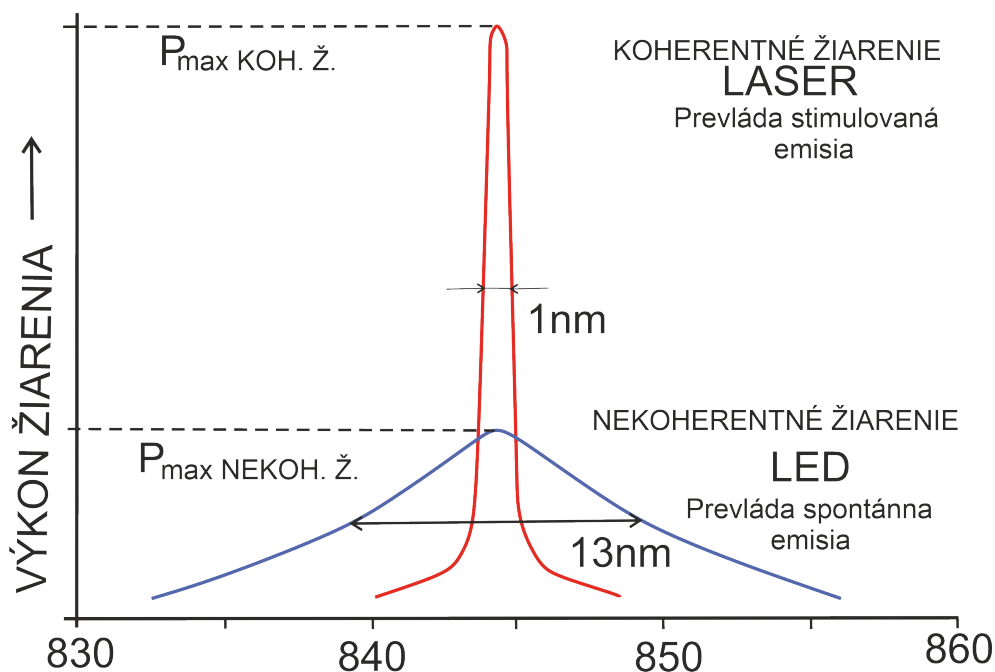
Obr. 6.2: Spontánna emisia [14].

Táto okolnosť vedie k postupnému zužovaniu spektra spontánnej emisie a výraznému rastu intenzity vyžarovania v oblasti maxima spektrálneho rozdelenia emisie. Ak rastie intenzita vyžarovania nelineárne s rastom budenia, tento proces sa nazýva superluminiscencia. Fotóny generované v procese superluminiscencie sa šíria rovnako ako v spontánnom režime vo všetkých smeroch s náhodnou fázou. Prechod do laserového režimu nastáva, keď sa stimulované zosílenie rovná stratám a žiarenie sa

stáva koherentným. Laserová dióda prechádza z nekoherentného zdroja do režimu laseru prekročením prahového prúdu  $I_P$ . Koherentné žiarenie je lineárne závislé na veľkosti budiaceho prúdu [14].



Obr. 6.3: Závislosť emitovaného optického výkonu na budiacom prúde [14].

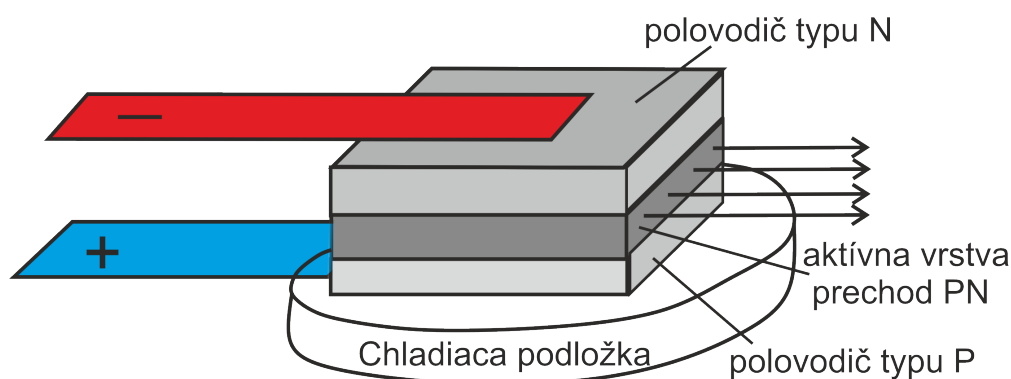


Obr. 6.4: Porovnanie šírky pásma emitovaného žiarenia pri spontánnej a stimulovanej emisii [14].

## 6.1 Delenie laserových diód

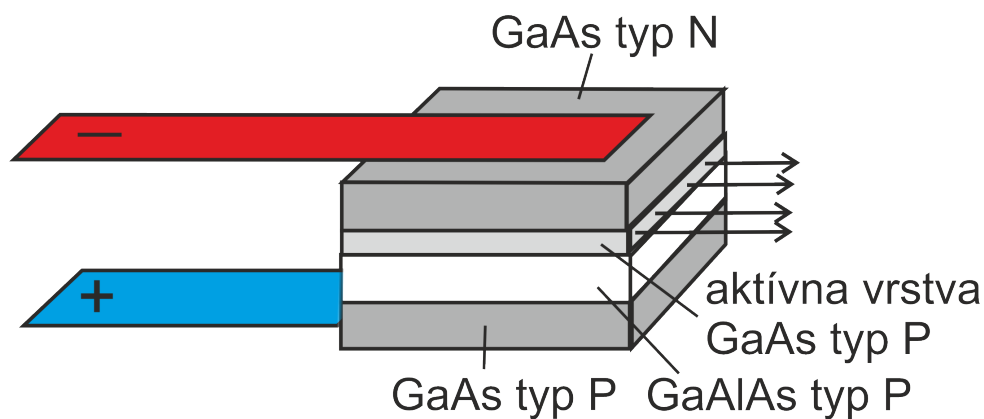
Podľa vnútornej štruktúry delíme laserové diódy na: [15]

1. Homoštruktúrne lasery – na tomto type laseru bola prvý krát dosiahnutá v roku 1962 emisia koherentného žiarenia (GaAs). V postate sú tvorené prechodom PN. Šírka rekombinačnej oblasti je difúznou dĺžkou menšinových nosičov (pre GaAs približne  $1 - 3 \mu\text{m}$ ). Vplyvom veľkej šírky aktívnej vrstvy je potrebná veľká prahová hustota prúdu. Pri generácii žiarenia dochádza k stratám vplyvom úniku žiarenia do okolitých vrstiev polovodiča z čoho vyplýva malá účinnosť. Pri prevoze je potrebné dostatočné chladenie. V praxi tento typ nemá veľké využitie. Návrh homoštruktúrnej diódy je na obrázku 6.5.



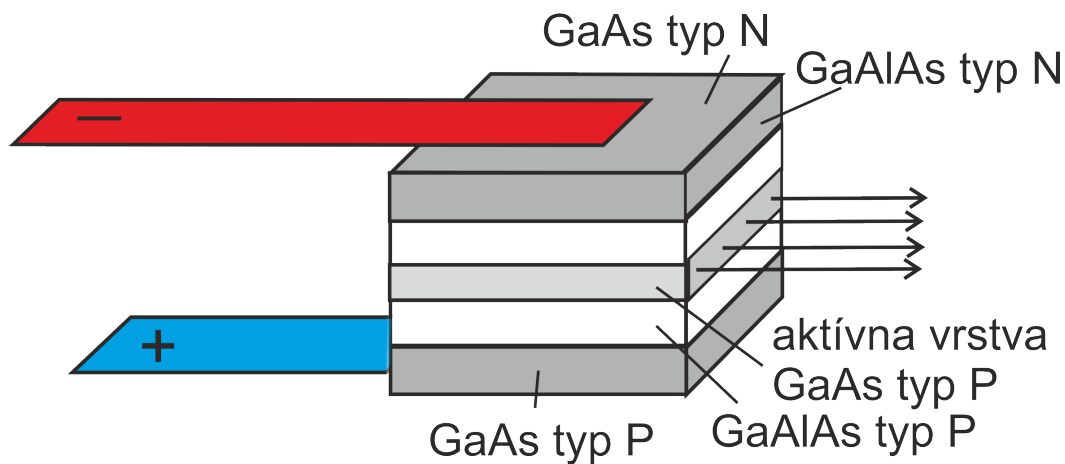
Obr. 6.5: Príklad homoštruktúrnej diódy [15].

2. Heteroštruktúrne lasery – heteroštruktúra je daná aspoň jednou vrstvou iného chemického zloženia ako je zloženie podložky. V jednoduchej heteroštrukúre vytvára heteroprechod jednu zo stien vlnovodu a súčasne aj potenciálovú bariéru sústredujúcou nosiče vnútri aktívnej vrstvy typ P. Hodnoty prúdových hustôt klesajú asi na pätinu hodnôt dosahovaných pri homoštruktúrnych laserov. Návrh heteroštruktúrnej diódy je na obrázku 6.6.



Obr. 6.6: Príklad heteroštruktúrnej diódy [15].

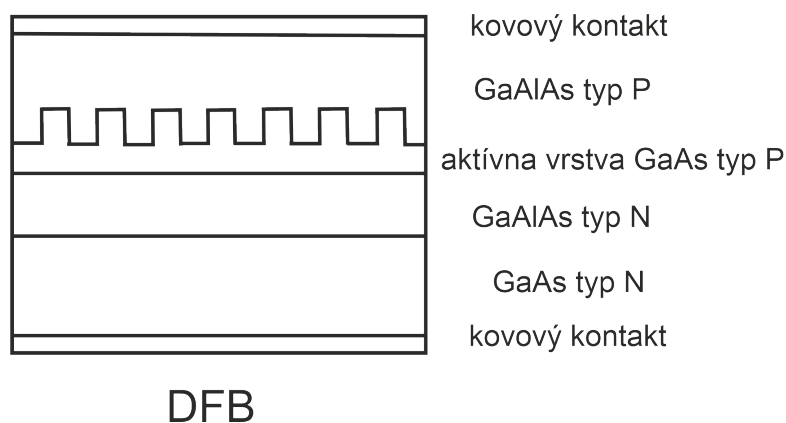
3. Lasery s dvojitou heteroštruktúrou – majú aktívnu vrstvu obklopenú z oboch strán vrstvami s väčšou šírkou zakázaného pásu, nosiče náboja i optického žiarenia sú sústredené do aktívnej oblasti z oboch strán, teda aj s väčšou účinnosťou. Nedochádza tu k úniku nosičov do okolitých vrstiev. Nahromadené nosiče v aktívnej vrstve sú vzhľadom k jej malému prierezu (až 100 nm) tak veľké, že laserový režim sa dosahuje už pri prahových prúdoch niekoľko desiatok mA. Účinnosť je veľmi vysoká, až okolo 75 %.



Obr. 6.7: Príklad diódy s dvojitou heteroštruktúrou [15].

4. Fabry Perot laserové diódy (FP) – tieto laserové diódy obsahujú dvojitú heteroštruktúru, ktorá obsahuje niekoľko kvantových jamiek. Povrchy laserového čipu pôsobia ako dutinové zrkadlá v dôsledku rozdielu indexu lomu laserového materiálu a okolitého vzduchu [16].

5. Lasery s rozprestrenou spätnou väzbou – tieto lasery sú označované ako DFB (Distributed Feed Back). Laser je realizovaný bez zrkadiel pomocou priestorových periodických štruktúr (difrakčných mriežok). Funkcia je založená na periodickej zmene indexu lomu v smere šírenia. Spätná väzba vzniká trvalým naviazaním šíriacej sa vlny do opačného smeru Braggovským rozptylom. Mriežka sa vytvára leptaním priamo na povrchu aktívnej vrstvy. Sú vhodnými zdrojmi pre systémy integrovanej optiky pre pásmo  $1,3 - 1,55 \mu\text{m}$ , pretože nahradením Fabry-Perotova rezonátoru optickou mriežkou umožňujú jednomódový prevoz. Tieto lasery dosahujú veľmi úzke spektrálnej šírky (pod  $1 \text{ nm}$ ) a poskytujú modulačnú šírku pásma hlboko do oblasti GHz. Používajú sa v mnohých aplikáciách ako napríklad v komunikáciách s optickými vláknami pre vlnové dĺžky  $1300$  a  $1550 \text{ nm}$ .

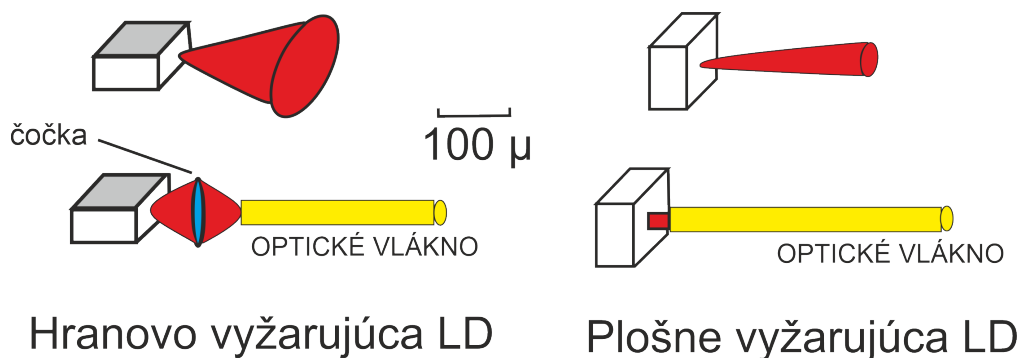


Obr. 6.8: Príklad DFB laseru [15].

- Lasery s kvantovými jamami - tento typ má dvojitú heteroštruktúru, v ktorej aktívna vrstva s rozdielnym zložením je tenká a tak sa pri generácii optického žiarenia uplatňujú kvantové javy, ktoré sú podmienené ich hrúbkou. Bežná hrúbka aktívnej vrstvy je 10 nm. Prahové prúdy sú približne v rozmedzí od desiatín mA po niekoľko desiatok mA. Účinnosť laserov s kvantovými jamami môže prekročiť až 80 % [15].

Rozdelenie laserových diód podľa miesta vyžarovania: [15]

- Hranovo vyžarujúce lasery – EEL (Edge Emiting Lasers). Laserová dióda vyžaruje z hrany prechodu.
- Plošne vyžarujúce lasery – VCSEL (Vertical Cavity Surface Emiting Lasers). Laserová dióda vyžaruje z plochy súčiastky rovnobežne s rovinou prechodu. Tento typ konštrukcie je výhodnejší ako hranovo vyžarujúca laserová dióda. Pri naviazaní svetelného žiarenia do optického vlákna sa dosahuje účinnosti až 80 %. VCSEL laserové diódy sú z hľadiska svojích vlastností veľmi využívané pre vláknové komunikačné systémy v oblasti vlnových dĺžok 1 300 a 1 550 nm, kde sa používajú pre veľké vzdialenosti jednomódové vlákna. V súčasnej dobe sa vývoj sústreďuje práve na tento typ konštrukčných technológií laserových diód.



Obr. 6.9: Schéma z hľadiska vyžarovania [15].

## 6.2 Základné parametre

Laserové žiarenie sa vyznačuje veľkou smerovosťou zväzku, monochromaticnosťou, koherenciou a vysokou žiarivosťou [17].

**Vysoká smerovosť zväzku** vyplýva z vlastností Fabry-Perotova rezonátoru, v ktorom existujú len tie typy vln, ktoré sa šíria pozdĺž osy rezonátoru s minimálnymi odchýlkami [17].

**Monochromaticnosť** je podmienená tým, že k zosilneniu elektromagnetickej vlny



dochádza len pri frekvencii  $\nu = (E_2 - E_1) / h$  a navyše ku generácii dochádza len na rezonančných frekvenciách použitého rezonátoru [17].

**Koherencia** je v obecnom zmysle charakteristika stupňa synchrónnosti dvoch kmitavých dejov. Pri elektromagnetickej vlně sa rozlišuje *priestorová* a *časová* koherencia. Pri *priestorovej koherencii* sa zvolia dva body  $P_1$  a  $P_2$  tak, aby v čase  $t_0$  prechádzala cez ne vlnoplocha elektromagnetickej vlny.  $E_1(t)$  a  $E_2(t)$  je intenzita elektrického pola v týchto dvoch bodoch. Ak bude fázový rozdiel rovný nule aj pri ďalšom čase  $t$ , nastáva úplná koherencia medzi bodmi  $P_1$  a  $P_2$ . Ak je úplná koherencia splnená pre všetky dvojice vlnoplochy, daná vlna spĺňa úplnú priestorovú koherenciu. Ak je skúmaná *časová koherencia* tak je skúmané elektromagnetické pole v bode  $P$  a v čase  $t$  a  $(t + \tau)$ . Ak je pre daný interval  $\tau$  rozdiel fáz elektromagnetickej vlny rovnaká pre ľubovoľné  $t$ , v časovom intervale existuje časová koherencia. Ak je podmienka splnená pre ľubovoľnú hodnotu  $t$ , je vlna charakterizovaná úplnou časovou koherenciou. Časová koherencia súvisí s monochromaticnosťou a elektromagnetická vlna s dobou koherencie  $\tau_k$  a má šírku spektrálnej čiary: [17]

$$\Delta \nu \approx 1/\tau_k.$$

Dôležitý je pojem **koherenčnej dĺžky**. Je to dĺžka na ktorej je svetlo ešte schopné interferencie. U laserových diód sa jedná o rádovo centimetre a napríklad u kvalitných laserov He-Ne rádovo o desiatky metrov [17]. Dĺžka koherencie môže byť použitá pre kvalifikáciu časového stupňa (nie priestorového) [18]. Niektoré lasery, najmä jednofrekvenčné polovodičové lasery, môžu mať veľmi dlhé koherenčné dĺžky, napr. 9,5 km pre Lorenzonovo spektrum so šírkou pásma 10 kHz. U monochromatických polovodičových laserov, aj keď pracujú v jednofrekvenčnom režime, je dĺžka koherencie obvykle o niekoľko rádov kratšia. Dĺžka koherencie je obmedzená fázovým šumom, ktorý môže vyplývať napr. zo spontánnej emisie v médiu zosilnenia. Vplyv kvantového šumu je slabý, keď je cirkulačný výkon v laseru vysoký, rezonátorové straty na jedno vybočenie sú nízke a doba vybočenia je dlhá [18].

Podľa furierovej analýzy sa dá ľubovoľný periodický tvar vlny považovať za superpozíciu sínusových vln [19]. Furierova syntéza znamená prekryvanie mnohých sínusových vln pre získanie ľubovoľného periodického tvaru vlny. Ktorákoľvek sada sínusovej vlny, ktorej frekvencia nebude patriť k harmonickej rade bude môcť vytvoriť komplexnú vlnu, ktorá nebude pravidelná. Ktorákoľvek neperiodický tvar vlny môže byť zostavený zo súboru sínusových vln. Každá zložka musí mať správnu amplitúdu a relatívnu fáz, aby vytvorila požadovaný tvar vlny [19]. Neexistuje len jediná univerzálna technika na meranie šírky pásma lasera alebo dĺžky koherencie [20]. Jedna metóda, ktorá je obzvlášť efektívna pre lasery s úzkou vlnovou dĺžkou (100 kHz až 100 MHz) je tzv. oneskorené meranie. Tu je vstupný lúč rozdelený na dva lúče pomocou deliča. Jedno rameno deliča je pripojené na dlhé vlákno a druhé rameno

je pripojené priamo na delič výkonu. Následne sa lúče znova kombinujú a signál je detekovaný pomocou rýchlej fotografickej diódy, ktorej výstup je pripojený k analyzátoru. Výhodou tejto metódy sú krátke časy merania a ľahká implementácia [20]. **Žiarivosť laseru** je definovaná ako žiarivý tok vyžarovaný z jednotkového povrchu zdroja do jednotkového priestorového uhlu. Vysoká hodnota žiarivosti je podmienená vysokou smerovosťou laserového zväzku. Ideálny profil laserového zväzku je gaussovský. Odchýlky reálneho gaussového priebehu od ideálneho sú spôsobené predovšetkým rovnomernosťami v rozmeroch aktívnej vrstvy [17].

**Divergencia** nastáva u laserových diód a je spôsobená difrakciou svetelnej vlny, pri prechode von z laserovej diódy. Vnútri laserovej diódy je svetelná vlna obmedzená v aktívnej vrstve. Veľkosť divergencie je nepriamo úmerná šírke aktívnej vrstvy. Vystupujúci zväzok je eliptického tvaru a divergencia sa uvádza v uhlových stupňoch v oboch rovinách os elipsy. Pri aplikácii sa spoločne s laserovými diódami používajú šošovky, ktoré divergenciu eliminujú [17].

**Polarizácia svetelnej vlny** – laserové diódy eliminujú vždy lineárne polarizované svetlo, ak pracujú v nadprahovom režime. Spôsobuje to polarizačná závislosť odrazu  $R$  emisnej plošky kryštálu. Tento efekt súvisí len s pravouhlými emisnými ploškami. Pomer medzi vertikálnym a paralelným vektorom polarizácie svetelného zväzku sa nazýva stupeň polarizácie. Pri nízkych pracovných prúdoch je podiel nepolarizovaného svetla väčší vplyvom spontánnej emisie. Pri prúdových nárastoch sa tento podiel znižuje a zväčšuje sa stupeň polarizácie. Laserové diódy pracujúce blízko ich výkonového maxima vykazujú stupeň polarizácie väčšie než 100:1 [17].

**Watt-Ampérová charakteristika** – medzi najdôležitejšiu charakteristiku laserovej diódy je závislosť jej optického výkonu na prechádzajúcom prúde. Ak postupne zvyšujeme prechádzajúci prúd, laserová dióda najprv vykazuje spontánnu emisiu, ktorá je charakterizovaná malou intenzitou (jednotky až desiatky  $\mu\text{W}$ ) a širokým, nemonochromatickým spektrom. Po dosiahnutí takzvaného prahového prúdu  $I_P$  dôjde k náhlemu prechodu z režimu spontánnej emisie do režimu stimulovanej emisie, intenzita vychádzajúceho svetla sa začne prudko zvyšovať a spektrálna šírka sa výrazne zúži, laserová dióda svieti monochromatickým koherentným svetlom, ktorého intenzita je lineárnou funkciou budiaceho prúdu. Zároveň dochádza ku kvalitatívnej zmene tvaru vyžarovanej charakteristiky vyjadrenej znižovaním uhlu v kolmej rovine, rovnobežne s rovinou prechodu PN a znižovaniu šírky pásma emitovaného žiarenia. Pri meraní Watt-Ampérovej charakteristiky laserovej diódy koherentným spôsobom je treba najprv stabilizovať pracovnú teplotu. K tomu sa najčastejšie v praxi využívajú peltiérove články. Meria sa obvykle pri dvoch teplotách a to pri základnej, tzv. pokojovej teplote  $25\text{ }^\circ\text{C}$  a pri vysokej teplote napr.  $80\text{ }^\circ\text{C}$ . Pri meraní Watt-Ampérovej charakteristiky najprv zistíme maximálny prúd, ktorý môže prechádzať diódou. V druhom kroku nastavíme zdroj prúdu na počiatočnú hodnotu

prúdu pod prahom, typicky 5 mA. Následne zmeriame optický výkon vychádzajúci z diódy na wattmeter. Zvyšujeme prúd v malých krokoch a pre každý prúd odčítame hodnotu optického výkonu. Najväčší nastavený prúd nesmie prekročiť hodnotu zistenú zo špecifikácii pre danú laserovú diódu, inak sa môže laserová dióda zničiť [17].

**Prahový prúd** – pri prahovom prúde prechádza laserová dióda do režimu stimulovanej emisie a začína sa emitovať koherentné žiarenie. Pre stanovenie prahového prúdu sa používa niekoľko metód, ktoré väčšinou vychádzajú z merania Watt-Ampérovej charakteristiky. Najpoužívanější metóda je lineárna extrapolácia. Pri tejto metóde sa Watt-Ampérová charakteristika v určitej intervale prúdu nad prahom preloží priamkou a jej priesečník s prúdovou osou nám udáva hodnotu prahového prúdu. Ďalšou významnou metódou je využitie numerickej derivácie Watt-Ampérovej charakteristiky, kde získané maximum stanoví hodnotou prahového prúdu. Presná hodnota prahového prúdu je veľmi dôležitým parametrom laserovej diódy. Čím nižšia je hodnota prahového prúdu, tým je laserová dióda kvalitnejšia. Kvalitné laserové diódy dosahujú prahových prúdov v jednotkách mA [17].

**Charakteristická teplota  $T_0$**  – vlastnosti laserových diód sa výrazne zhoršujú s rastúcou teplotou. Prahový prúd rastie. Hlavným dôvodom je, že pri vyššej teplote sa aktivujú nežiarivé procesy v polovodiči, ktoré premenia časť vychádzajúceho svetla na teplo. Pre určenie charakteristickej teploty je nutné merať Watt-Ampérovú charakteristiku aspoň pri dvoch rôznych teplotách. Prahový prúd je exponenciálnou funkciou teploty a to umožňuje vypočítať charakteristickú teplotu  $T_0$  podľa vzťahu: [17]

$$T_0 = \frac{(T_{max} - T_{min})}{\ln\left(\frac{I_{T_{max}}}{I_{T_{min}}}\right)}$$

Výsledná hodnota charakteristickej teploty  $T$  udáva, ako veľmi je laserová dióda závislá na teplotných zmenách, respektíve akú môžeme očakávať závislosť prahového prúdu na teplote – čím je hodnota  $T_0$  vyššia, tým je teplotná závislosť menšia a naopak.

**Relaxačná rezonančná frekvencia** – jej určenie je dôležité pre určenie maximálnej frekvencie, s ktorou sa dá laserová dióda modulovať, aby nedošlo ku skresleniu prenášaného signálu. Jej veľkosť je úmerná odmocnine prúdu nad prahom, býva jednotky až desiatky GHz. V praxi sa používa odhad, že relaxačná frekvencia by mala byť minimálne 2,5 násobkom maximálnej modulačnej frekvencie [17].

**Prírastok prúdu nad prahom, ktorý je potreba pre dosiahnutie daného optického výkonu** – ak máme prahový prúd 12,5 mA a veľkosť dosiahnutého výkonu je 0,6 mW je pri 24 mA tak  $\Delta I_f = 24 \text{ mA} - 12,5 \text{ mA} = 11,5 \text{ mA}$  [17].

**Optický výkon pri prahovom prúde** – býva radovo  $\mu\text{W}$ .

**Napätie na laserovej dióde pri danom optickom výkone** – toto napätie nájdeme na Volt-Ampérovej charakteristike. Napätie laserovej diódy v priepustnom

smere sa mení len veľmi málo v meranom rozsahu prúdov a je typicky okolo 1V.

**Sériový odpor diódy v priepustnom smere** – vypočíta sa z Ohmová zákona  $R_S = U / I$  pre danú hodnotu optického výkonu.

**Prúd za tmy** – laserovou diódou pri prepätí 2V netečie žiadny prúd a laserová dióda nesvieti. Temné prúdy sú veľmi malé, radovo nA.

**RIN** – minimálizácia šumu relatívnej intenzity laserovej diódy je dôležitým faktorom na získanie optimálneho výkonu systému v mnohých optických komunikačných systémoch. RIN definuje hladinu šumu laseru [21]. Laserový šum relatívnej intenzity je často spojený s prenosom optických dát. V analógových komunikačných systémoch, ako je káblová televízia, môžeme relatívnu intenzitu šumu obmedziť pomocou pomeru signál - šum. Vo vysoko-rýchlostných digitálnych systémoch môže RIN za určitých podmienok obmedziť bitovú chybovosť a výkon systému. Znalosti RIN môžu byť použité pri navrhovaní laserov pre zlepšenie ich výkonu pre špecifické aplikácie. Lasery s veľmi nízkym RIN sa používajú k stanoveniu úrovne šumu zosilňovačov optických vlákien, ktoré sú nezbytné pre budovanie rýchlejších a efektívnejších optických komunikačných systémov [22]. Laserová relatívna intenzita šumu závisí na mnohých veličinách, z nich najdôležitejšími sú frekvencia, výstupný výkon, teplota, modulačná frekvencia, časové oneskorenie a veľkosť optickej spätnej väzby. u niektorých druhov multimodových laserov môže byť RIN taktiež ovplyvnený komponentami systému, ktoré majú vlastnosti polarizácie alebo selektivity na vlnovej dĺžke. Prevažujúcim zdrojom RIN je však obvykle spontánna emisia. Nízkofrekvenčné RIN je teda na maximum tesne nad prahovou hodnotou, snižujúci sa s rastúcim výstupným výkonom – dajú sa výrazne zvýšiť optickou spätnou väzbou, aj pri vysokom výstupnom výkone. RIN môžeme určiť pomocou optických korelačných techník, často sa meria pomocou priamej detekcie. V tomto prípade sa meria výstup jednosmerného fotoprúdu z detektoru osvetleným testovacím laserom a striedavý šum na výstupe detektoru je zosilnený a potom zobrazený na vysokofrekvenčnom spektrálnom analyzátore [22]. Laserová relatívna intenzita šumu sa skladá z dvoch častí: Poissonove komponenty a komponenty, ktoré sa označujú ako nadmerne RIN. Poissonov RIN je minimálny RIN dosiahnutý klasickým svetlom. Často sa nazýva štandardný kvantový limit. Nadmerný RIN popisuje odchýlku od Poissonovej štatistiky. Pre klasické svetlo je nezáporné a pre Poissonovo svetlo nulové [22].

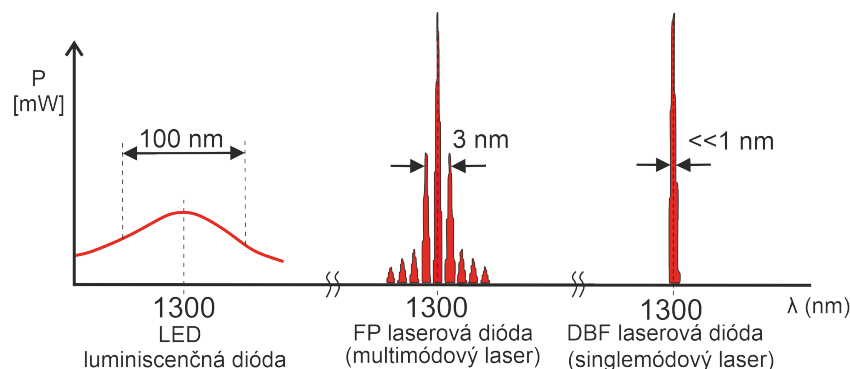
**Diferenciálna účinnosť** – Pre aplikácie laserových diód v telekomunikáciách je nutné, aby zmena prúdu napr. o 10 mA nad prahom, zmenila intenzitu vyžiareného svetla napr. o 1 mW. Tomuto podielu zmeny optického výkonu ku zmene prúdu ( $dP/dI$ ) sa hovorí  $\eta_f$  a používa sa tiež označenie  $\eta f$ . V podstate sa jedná o sklon Watt-Ampérovej charakteristiky.  $\eta_f$  charakterizuje účinnosť premeny elektrického prúdu na svetlo.

**Spektrum** – je to súbor vlnových dĺžok, na ktorých laserová dióda vyžaruje. Oproti

luminiscenčnej LED dióde je spektrum laserovej diódy veľmi úzke (desatiny až jednotky nm), čo dovoľuje prenos po optickom vlákne na veľké vzdialenosti bez skreslenia signálu. Typické spektrum laserovej diódy s Fabry-Perotovým rezonátorom obsahuje niekoľko pozdĺžnych modov, ktorých vlnová dĺžka je daná rezonátorom, respektívne jeho dĺžkou a materiálom.  $\Delta\lambda$  je vzdialenosť medzi pozdĺžnymi módy laserovej diódy. Spektrum je charakterizované hlavným píkcom a postrannými píkmi. Platí, že pre každý násobok vlnových dĺžok svetla, ktorý sa presne vojde do rezonátoru, existuje jeden pozdĺžny mód. Vzdialenosť medzi módy ( $\Delta\lambda$ ) je určená dĺžkou rezonátoru ( $L$ ), vlnovou dĺžkou vyžiareného svetla ( $\lambda$ ) a indexom lomu materiálu ( $n$ ) [17].

$$\Delta\lambda = \lambda^2 / (2nL).$$

Snahou konštruktérov laserových diód bolo odstrániť postranné módy a vyvinuli tak diódy so špeciálnou štruktúrou, ktoré majú už len výrazný hlavný pík a veľmi potlačené postranné píky. Tieto laserové diódy sa označujú ako DFB lasery (Distributed Feed Back). Porovnanie spektier rôznych typov laserov je vidieť na obrázku 6.10. Spektrum laserových diód je závislé na teplote. S rastúcou teplotou (kryštál sa rozťahuje a index lomu materiálu sa zväčšuje) sa posúva spektrum smerom k vyšším hodnotám vlnových dĺžok. Keďže je spektrum teplotne závislé, bude sa meniť tiež s rastúcim prúdom. Meranie spektra sa prevádza pomocou optických spektrálnych analyzátorov (napr. Agilent, Anritsu, Exfo). Tie využívajú optických mriežok pre rozlíšenie jednotlivých vlnových dĺžok, ktoré sa vhodné natáčajú. Bežné najmenšie rozlíšenie sa pohybuje okolo desiatín až stotín nm. Najpoužívannejšie vlnové dĺžky svetla laserových diód sú dané predovšetkým komunikačnými oknami, ktoré sa vyskytujú v optických vláknach. Tieto oblasti sú 800 – 900 nm, 1 300 nm a 1 550 nm [17].



Obr. 6.10: Spektrá polovodičových zdrojov žiarenia [17].

## 6.3 Využitie optických diód

Hlavnými výhodami laserových diód sú predovšetkým: [23]

- vysoká účinnosť premeny elektrickej energie koherentného optického žiarenia,
- malá zotrvačnosť, ktorá dovoľuje laseru moduláciu až do frekvencii  $10^{10}$  Hz,
- miniatúrne rozmery podmienené existenciou vysokých hodnôt zisku v objeme polovodiča,
- jednoduchosť súčiastky, možnosť nízkonapäťového napájania.

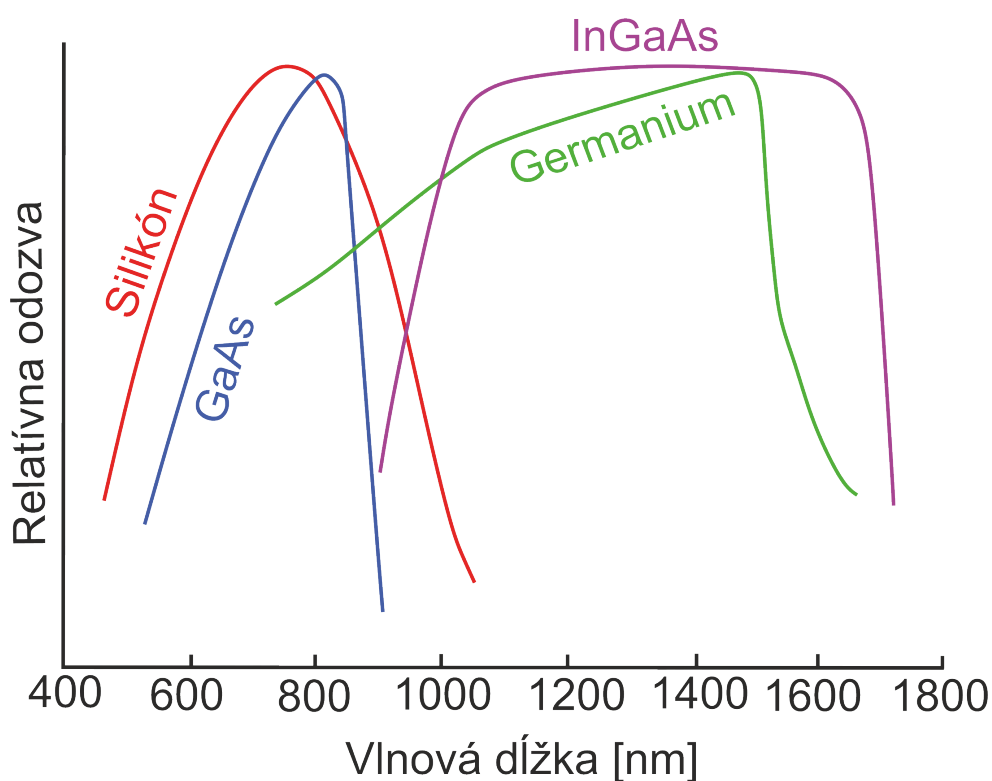
Medzi nedostatky laserových diód patrí:

- nižšia priestorovosť a časová koherencia generovaného optického žiarenia,
- nižšia teplotná stabilita a odolnosť proti vplyvom ionizujúceho žiarenia.

Najvýznamnejšie využitie laserových diód je v optických telekomunikáciách, kde sa k prenosu využívajú optické vlákna majúce v určitých oblastiach vlnových dĺžok minimálny útlm. Laserové diódy v podstate prevádzajú elektrický signál v podobe modulačného elektrického prúdu na odpovedajúci optický signál, ktorý je následne naviazaný do optických vlákien a nimi prenášaný na malé či veľké vzdialenosti. Ďalej sa laserové diódy používajú k zaznamenávaniu informácie na optické disky s veľkou hustotou a rýchlosťou záznamu alebo čítania. Dajú sa použiť v optických lokátoroch alebo na meranie dĺžok a rýchlosti. Väčšina laserových diód s ktorými sa bežne stretávame sú lasery malého výkonu pracujúce kontinuálne, napríklad laserové ukazovádky, laserové tlačiarne, CD prehrávače, CD-R-RW a DVD mechaniky či optodisky známe ako minidisky [23].

## 7 FOTODETEKTOR

Fotodetektory sa používajú na detekciu svetla – vo väčšie prípadoch optických síl. Presnejšie, detektormi sa obvykle chápu fotónové detektory, ktoré využívajú fotocitlivosť elektrických nosičov. Fotodetektory vysielať elektronický výstupný signál – napríklad napätie alebo elektrický prúd, ktorý je úmerný dopadajúcej optickej energii. Prevádzajú svetelné signály na elektrické signály, ktoré sa potom môžu zosilniť a spracovať. Dobré fotodetektory musia byť citlivé v danej spektrálnej oblasti [24]. Polovodičové fotodiódy sú najbežnejšie používané detektory v systémoch s optickými vláknami, pretože poskytujú dobrý výkon a majú malý rozmer. Môžu byť vyrobené z kremíka, germánia, GaAs, InGaAs atď [25]. Vlnové dĺžky, pri ktorých detektor reaguje na svetlo, závisia od zloženia materiálu detektora (obrázok 7.1) [25].



Obr. 7.1: Odozva detektora na rôzne materiály [25].

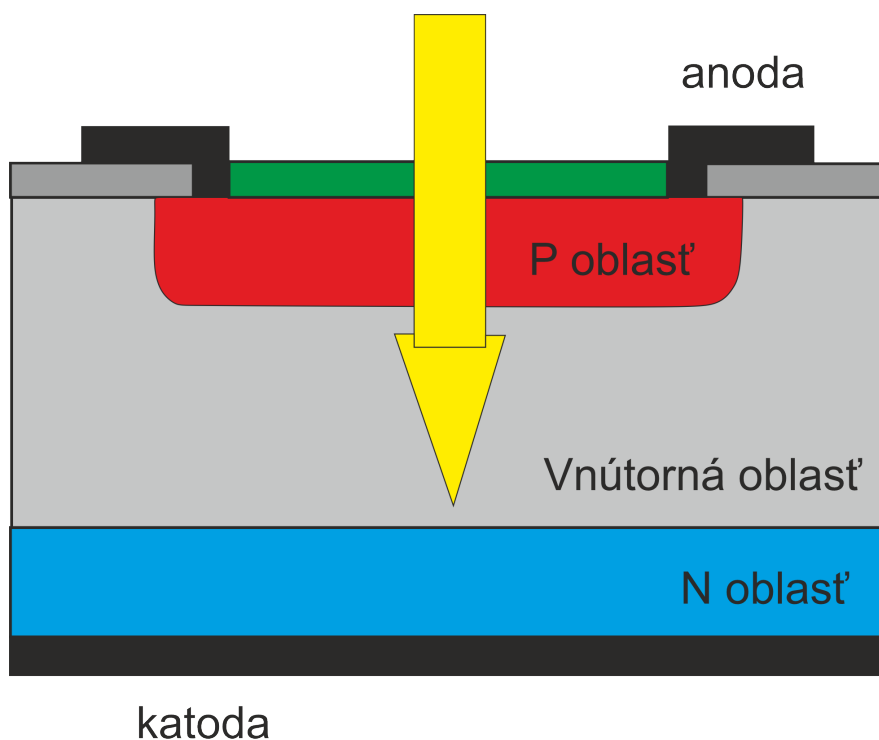
Najbežnejším polovodičovým fotodetektorom je fotodióda PIN (obrázok 7.2).

Má vnútornú polovodičovú oblasť vloženú medzi pozitívne dotovanú a negatívne dotovanú oblasť. Pretože vnútorná oblasť nemá žiadne náboje, jej odpor je vysoký, takže na túto oblasť je privedená väčšina spätného napätia. Oblasť je obvykle široká, prichádzajúce fotóny majú väčšiu pravdepodobnosť absorpcie vo vnútornej oblasti ako v oblastiach p alebo n [25].

## 7.1 Delenie fotodetektorov

Existujú rôzne typy fotodiód, ktoré je možné použiť. Ponúkajú rôzne vlastnosti a používajú sa v rôznych oblastiach [26].

1. Fotodióda PN – bola prvou formou fotodiódy, ktorá bola vyvinutá. Jej výkon nieje až tak vysoký ako pri iných typoch, a preto sa v súčasnosti používa menej [27].
2. Fotodióda PIN – je jednou z najpoužívanejších foriem fotodiód v súčasnosti. PIN fotodióda zhromažďuje svetelné fotóny efektívnejšie ako fotodióda PN, pretože vnútorná oblasť medzi oblasťami P a N umožňuje prijať viac svetla a navyše ponúka nižšiu kapacitu. Nachádza sa v audio CD prehrávačoch, DVD mechanikách a používa sa v optických komunikačných systémoch. Používajú sa ako detektory elektromagnetického a jadrového žiarenia [27].



Obr. 7.2: Schéma fotodiódy PIN [25].

3. Fotodiódy APD – tzv. lavínové fotodiódy majú podobnú štruktúru ako fotodióda PN alebo PIN. Hlavný rozdiel lavínovej fotodiódy od iných typov fotodiód je ten, že pracuje v podmienkach s vysokou spätnou väzbou. To umožňuje lavínové množenie dier a elektrónov vytvorených nárastom fotónov. Keď fotón vstúpi do oblasti vyčerpania a vytvorí elektrónový pár, tieto nosiče náboja sú od seba veľmi ďaleko. Ich rýchlosť sa zvýši a zrazením s mriežkou,



vytvoria ďalšie dvojice elektrónových párov a proces sa opakuje. Lavínová fotodióda dosahuje vysokú citlivosť ale je potrebné oveľa vyššie prevádzkové napätie. Používa sa v oblastiach so slabým osvetlením, z dôvodu jej vysokej úrovne zisku [28].

4. Schottkyho fotodióda – malý prechod diódy znamená, že má veľmi malú kapacitu spojenia, čo jej umožňuje pracovať vo vysokých rýchlostiach. Používa sa hlavne v optických komunikačných systémoch s veľkou šírkou pásma, napríklad v optických spojoch [29].

## 7.2 Základné parametre

Citlivosť meria odozvu na optický vstupný signál ako funkciu jeho intenzity. Citlivosť fotodetektora je charakterizovaná ako kvantová účinnosť a citlivosť [24].

**Kvantová účinnosť** – meria frakciu fotónov, ktoré generujú elektróny v detektore. Je to pomer počtu generovaných elektrónových dier k počtu dopadajúcich fotónov. Môže sa vypočítať pomocou

$$\eta = (1 - R)\zeta(1 - e^{-\alpha\omega}) \quad (7.1)$$

kde  $R$  = koeficient odrazu na povrchu polovodiča vo vzduchu  $\zeta$  = zlomok párov elektrónových dier prispievajúcich k fotografickému prúdu  $\alpha$  = absorpčný koeficient  $\omega$  = vzdialenosť, v ktorej sa absorbuje optická energia [24].

**Citlivosť** – je pomer elektrického výstupu z detektora k vstupnej optickej energii. Ak sa výstupný prúd úmerne mení so vstupom, meria sa to ako ampér na watt. Pretože v komunikačných systémoch s optickými vláknami sú vstupné sily obvykle na úrovni  $\mu\text{W}$ . Účinnosť je možné vypočítať podľa vzorca

$$\rho = \frac{\lambda_0}{1,24} \eta \quad (7.2)$$

kde  $\lambda_0$  sa meria v  $\mu\text{m}$  a  $\eta$  je kvantová účinnosť [24].

**Čas nábehu** – je doba, po ktorej výstupný signál vzrastie z 10 % na 90 % maximálnej hodnoty po okamžitom zapnutí vstupu [24].

**Doba poklesu** – je doba, po ktorej výstupný signál klesne z 90 % na 10 % maximálnej hodnoty po náhlom vypnutí vstupu [24].

**Šírka pásma fotodetektora** – je zvyčajne definovaná ako frekvencia, po ktorej výstupný signál klesol na 3 dB (50 %) pod výkon pri nízkej frekvencii. To znamená, že iba polovica signálu prechádza cez detektor pri vyššej frekvencii [24].

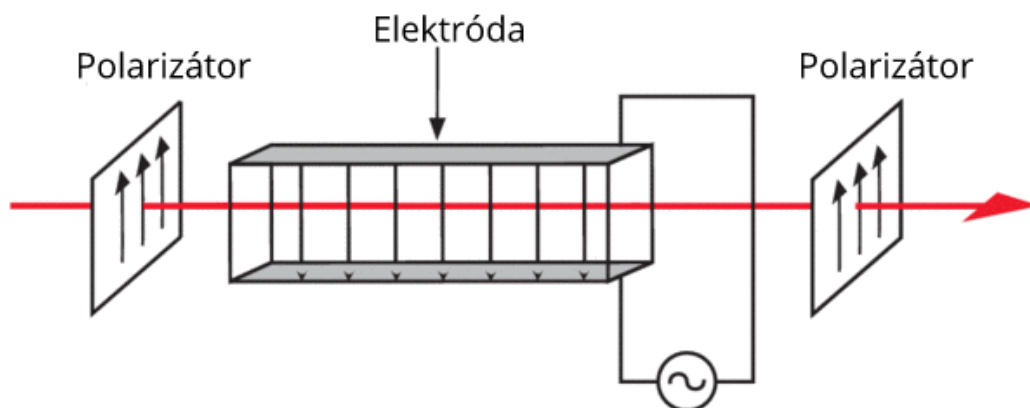
**Temný prúd** – je to prúd fotodiódy v neprítomnosti svetla, ktorý vzniká vo fotovodivom režime. Temný prúd obsahuje fotoprúd generovaný žiarením pozadia a saturačný prúd polovodičového spojenia. Temný prúd závisí od prevádzkovej teploty, predpätia a typu detektora [24].

## 7.3 Využitie fotodetektora

Fotodetektory sa používajú v rádiometrii a fotometrii, kde sa dajú použiť na meranie vlastností, ako je optická energia, svetelný tok, optická intenzita, žiarenie. Používajú sa na meranie optických síl, napr. v spektrometroch, svetelných bariérach, zariadeniach na uchovávanie optických údajov, autokorelátoroch, fluorescenčných mikroskopoch a rôznych typoch optických senzorov. Obzvlášť citlivé fotodetektory sú potrebné pre laserové diaľkomery, experimenty s kvantovou optikou a zariadenia pre nočné videnie. Rýchle fotodetektory sa používajú na komunikáciu pomocou optických vlákien, metrológiu optickej frekvencie a na charakteristiku impulzných laserov alebo laserového šumu [25].

## 8 MODULÁTOR

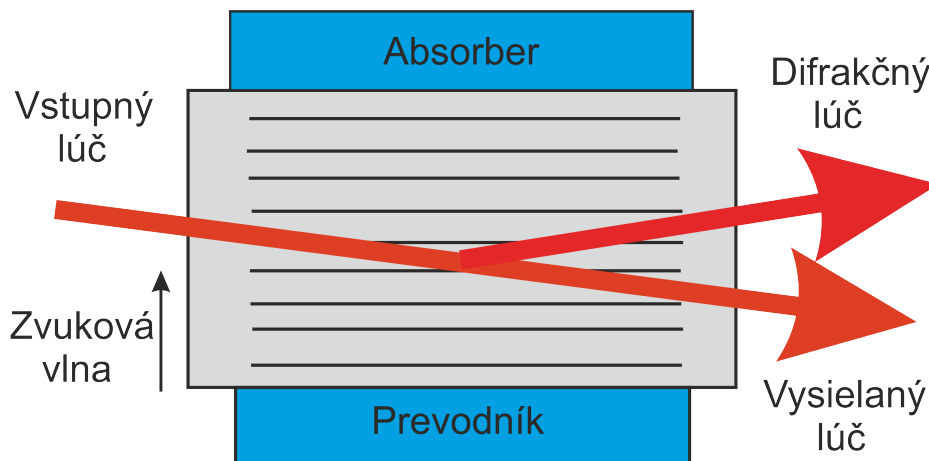
Elektro-optický modulátor je zariadenie, ktoré sa môže používať na riadenie výkonu (modulátory intenzity), fázy (fázové modulátory) alebo polarizácie svetla pomocou elektrického riadiaceho signálu. Typicky obsahuje jednu alebo dve Pockelsove bunky a prípadne ďalšie optické prvky, ako napríklad polarizátory [30]. Schéma funkcie elektro-optického modulátora je na obrázku 8.1.



Obr. 8.1: Elektro-optický modulátor [31].

Akusto-optický modulátor je možné použiť na riadenie výkonu laserového lúča pomocou elektrického pohonu. Je založená na akusto-optickom účinku, to je modifikácia indexu lomu kryštálu alebo skleneného materiálu oscilujúcim mechanickým namáhaním zvukovej vlny. Obvykle sa akusto-optický modulátor chápe modulátor intenzity. Iné akusto-optické zariadenia sú vhodné na posun optickej frekvencie (akusto-optický frekvenčný posunovač) alebo posun priestorového smeru (akusto-optické deflektory). Hlavný prvok akusto-optického modulátoru je kryštál (alebo kúsok skla), cez ktorý sa šíri svetlo. Piezoelektronický menič pripojený na kryštál získava silný oscilačný elektrický signál z RF budiča a používa sa na vybudenie zvukovej vlny s frekvenciou rádovo 100 MHz a akustickou vlnovou dĺžkou, ktorá je zvyčajne v rozmedzí medzi  $10\ \mu\text{m}$  a  $100\ \mu\text{m}$ . Zvuková vlna generuje pohybujúcu sa deformačnú vlnu v materiáli. Prostredníctvom fotoelastického efektu to vedie k pohyblivej refrakčnej mriežke indexu lomu, pri ktorej môže nastať Braggova difrakcia [33].

Optická frekvencia ohybového nosníka je zvýšená alebo znížená frekvencia zvukovej vlny (v závislosti na smere šírenia akustických vln vzhľadom k nosníku) a šíri sa trochu iným smerom. Schéma akusto-optického modulátora je na obrázku 8.2



Obr. 8.2: Schéma akusto-optického modulátora [33].

## 8.1 Druhy modulátorov

1. Akusto-optické modulátory – používajú sa na prepínanie alebo nepretržité nastavovanie amplitúdy laserového lúča, na posúvanie jeho optickej frekvencie alebo jeho priestorového smeru [33].
2. Fázové modulátory – je to najjednoduchší typ elektro-optického modulátoru, ktorý obsahuje Pockelsovu bunku, kde elektrické pole (aplikované na kryštál prostredníctvom elektród) mení fázové oneskorenie laserového lúča vysielaného cez kryštál. Polarizácia vstupného lúča musí byť často zarovnaná s jednou z optických osí kryštálu, aby nedošlo k zmene stavu polarizácie. Mnoho aplikácií vyžaduje iba malú (periodickú alebo neperiodickú) fázovú moduláciu. Napríklad je to často prípad, keď je používaná VPM na monitorovanie a stabilizáciu rezonančnej frekvencie optického rezonátora. Rezonančné modulátory sa často používajú, keď je dostatočná periodická modulácia a umožňujú veľkú hĺbku modulácie s miernym hnacím napätím. Hĺbka modulácie môže byť v niektorých prípadoch tak vysoká, že v optickom spektre sa generujú desiatky postranných pásiem (hrebeňové generátory, frekvenčné hrebene) [30].
3. Polarizačné modulátory – v závislosti od typu nelineárneho kryštálu a smeru použitého elektrického poľa môže fázové oneskorenie závisieť od polarizačného smeru. Pockelsovu bunku je preto možné považovať za napäťovo riadenú vlnovú dosťičku a môže sa použiť na moduláciu stavu polarizácie [30].
4. Modulátory amplitúdy alebo intenzity – v kombinácii s inými optickými prvkami, najmä s polarizátormi, sa Pockelsove bunky môžu použiť na iné druhy modulácie. Konkrétne je modulátor amplitúdy založený na Pockelsovej bunke na modifikáciu stavu polarizácie a polarizátora na jeho následnú premenu

zmeny prenášanej optickej amplitúdy a výkonu [30].

## 8.2 Základné parametre

**Frekvencia** – rozsah frekvencie pri ktorom modulátor pracuje [MHz].

**Strata modulácie** – je definovaná ako pomer vstupného výkonu ku výstupnému výkonu [dB].

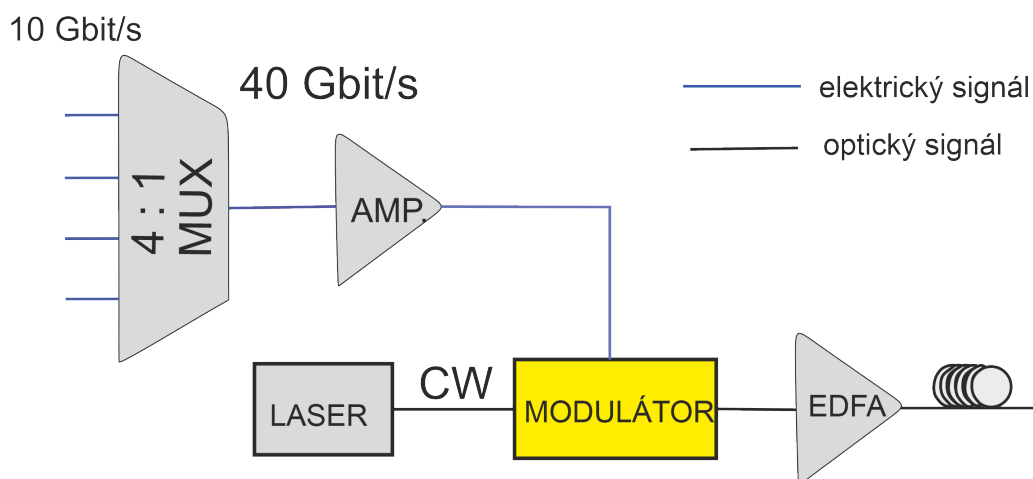
**Čas nábehu** – je doba, po ktorej výstupný signál vzrastie z 10 % na 90 % maximálnej hodnoty po okamžitom zapnutí vstupu.

**Doba poklesu** – je doba, po ktorej výstupný signál klesne z 90 % na 10 % maximálnej hodnoty po náhlom vypnutí vstupu.

**Hĺbka modulácie** – vyjadrená v %. Určuje percento modulácie oproti pôvodnému signálu [34].

## 8.3 Využitie elektro-optického modulátora

Elektro-optické modulátory sa využívajú napríklad na modulovanie výkonu laserového lúča, napríklad na laserovú tlač, vysokorýchlostný digitálny záznam údajov alebo vysokorýchlostnú optickú komunikáciu. Modulátory sa používajú na uzamykanie v aktívnom režime, ako spínače impulzov v pulzných snímačoch, regeneratívnych zosilňovačoch a dutých laseroch [30]. Funkcia elektro-optického modulátora vo vysielacom systéme je na obrázku 8.3.

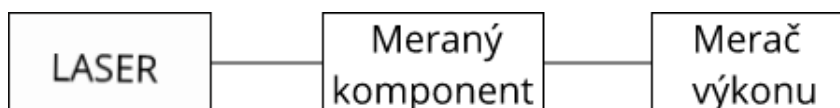


Obr. 8.3: Funkcia elektro-optického modulátora vo vysielacom systéme [32].

## 9 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

### 9.1 Návrh merania optických komponentov

Optické komponenty budú merané priamou metódou. Pred každým meraním budú optické konektory očistené pomocou čistiacieho pera. Na meranie sa použije zdroj výkonu (laser OPTOWARE mLS – 100 mini LIGHT SOURCE) a optický výkonový merač (Optical Power Meter). Pred každým meraním optickej súčiastky sa stanoví referencia zdroju a výkonového merača. Zmeraná referencia bude zaznamenaná pre obe vlnové dĺžky, na ktorých laser pracuje (1310 nm a 1550 nm). Následne sa zmerajú všetky vybrané optické komponenty. Jeden port optickej súčiastky sa pripojí do zdroja výkonu a druhý port sa pripojí na merač výkonu. Na prepojenie sa použijú optické spojky. Týmto spôsobom sa premerajú všetky možné kombinácie konektorových dvojíc. Pri deličoch výkonu sa meria vložný útlm a izolácia. Kvalitný delič výkonu má čo najväčšiu izoláciu a čo najmenší vložný útlm. Izolácia je meraná v dB a určuje izoláciu medzi jednotlivými portami, aby signál zo vstupu prechádzal len na daný výstupný port. Strata vloženia je rozdiel medzi vstupným signálom a signálom, ktorý má byť na danom výstupnom porte. Strata vloženia je meraná v dB. Pri cirkulátoroch sa meria vložný útlm, izolácia a presluch. Presluch spôsobuje nežiadúci účinok prenášaného signálu medzi portom jedna a portom tri. Pri určovaní kvality izolátora sú dôležitými parametrami vložný útlm a izolácia. Všetky zmerané parametre budú zapísané do prehľadnej tabuľky. Schéma merania optických komponentov priamou metódou je na obrázku 9.1.

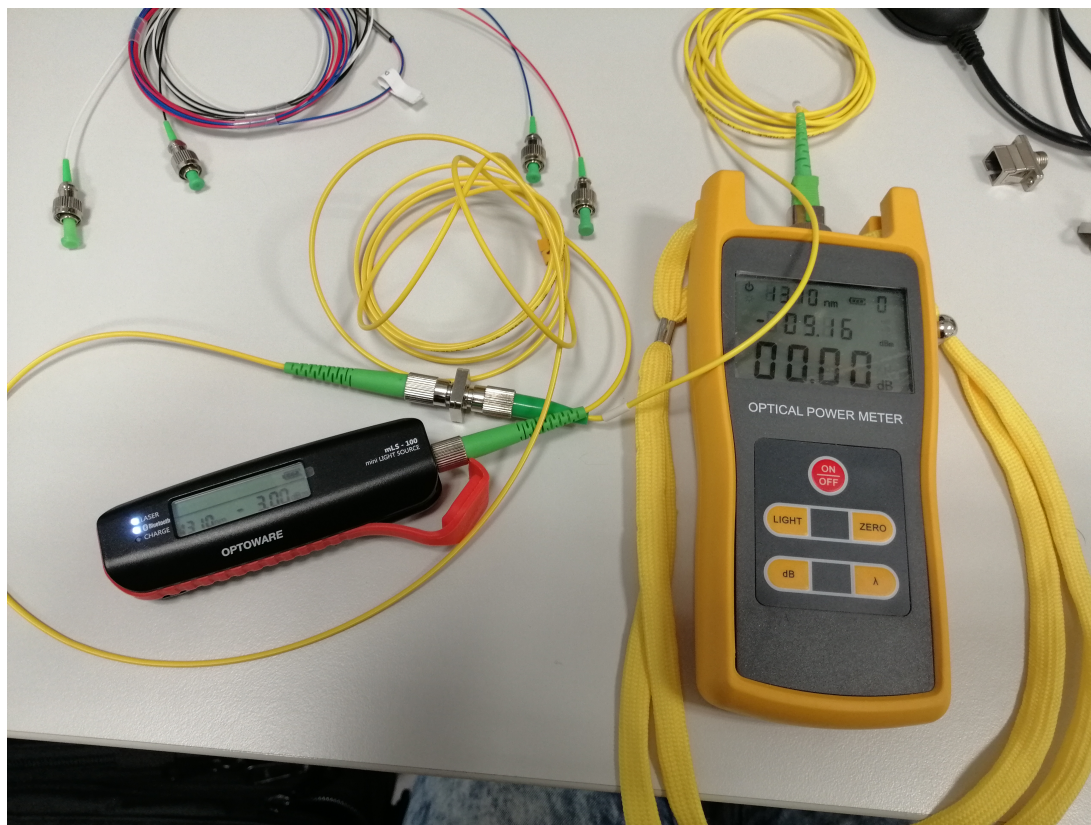


Obr. 9.1: Blokové schéma merania optických komponentov priamou metódou.

#### 9.1.1 Meranie Deličov výkonu, izolátorov a cirkulátorov

Na meranie bol použitý laser OPTOWARE mLS – 100 mini LIGHT SOURCE. Laser vyžaruje na vlnovej dĺžke 1310 nm a 1550 nm. Výkon laseru pri každom meraní bol 3 dBm. Meranie bolo realizované pomocou optického výkonového merača (Optical Power Meter). Pred každým meraním bola zaistená referencia meracieho prístroja. Každá optická súčiastka bola zmeraná pre obe vlnové dĺžky. Referencia výkonu laseru a power metru pri vlnovej dĺžke 1310 nm bola približne -9,1 dBm, čo odpovedá

približne  $123 \mu\text{W}$ . Pri vlnovej dĺžke  $1550 \text{ nm}$  bola referencia laseru a power metru približne  $-7,7 \text{ dBm}$ , čo je približne  $170 \mu\text{W}$ . Útlm pri každej vlnovej dĺžke a pred každým meraním bol vynulovaný. Kalibrácia laseru a power metru je na obrázku 9.2.



Obr. 9.2: Referencia laseru a power metra pred meraním.

### 9.1.2 Namerané hodnoty

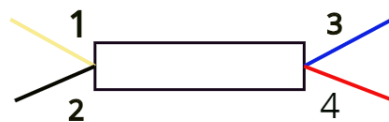
Delič výkonu 46/54 SN: 72658887 $\lambda = 1310 \text{ nm}$				
Port	Výkon[dBm]	Výkon[ $\mu$ W]	Vložný útlm[dB]	Izolácia [dB]
1 – 3	-12,73	53,3	3,57	–
3 – 1	-12,73	53,3	3,57	–
1 – 4	-12,09	61,8	2,93	–
4 – 1	-12,51	56,1	3,35	–
2 – 4	-13,19	47,9	4,02	–
4 – 2	-13,07	49,3	3,91	–
2 – 3	-12,59	55,0	3,43	–
3 – 2	-12,78	52,72	3,81	–
1 – 2	-50,00	0,01	–	41,02
2 – 1	-50,00	0,01	–	41,02
3 – 4	-50,00	0,01	–	40,05
4 – 3	-50,00	0,01	–	40,05

Tab. 9.1: Namerané hodnoty SN: 72658887 s referenciou -9,1 dBm.

Delič výkonu 38/62 SN: 72658887 $\lambda = 1550 \text{ nm}$				
Port	Výkon[dBm]	Výkon[ $\mu$ W]	Vložný útlm[dB]	Izolácia [dB]
1 – 3	-11,49	70,95	3,08	–
3 – 1	-13,32	46,55	4,91	–
1 – 4	-11,34	73,45	2,94	–
4 – 1	-13,78	41,87	5,37	–
2 – 4	-11,09	77,80	2,68	–
4 – 2	-11,58	69,50	3,18	–
2 – 3	-10,90	81,28	2,50	–
3 – 2	-11,09	77,80	2,63	–
1 – 2	-50,0	0,01	–	42,14
2 – 1	-50,0	0,01	–	42,14
3 – 4	-41,45	0,07	–	33,93
4 – 3	-41,45	0,07	–	33,93

Tab. 9.2: Namerané parametre SN: 72658887 s referenciou -7,7 dBm.





Obr. 9.3: Schéma meraného deliča výkonu 7265887.

Výpočet deliaceho pomeru deliča výkonu SN: 72658887 s  $\lambda = 1310 \text{ nm}$

- vstup port 1 a výstup na portoch 3 a 4 je 53,70% : 46,30%.
- vstup port 2 a výstup na portoch 3 a 4 je 53,45% : 46,55%.
- vstup port 3 a výstup na portoch 1 a 2 je 50,27% : 49,73%.
- vstup port 4 a výstup na portoch 1 a 2 je 53,23% : 46,77%.

Z uvedeného vyplýva že deliaci pomer deliču SN: 72658887 je 46/54.

Výpočet deliaceho pomeru deliča výkonu SN: 72658887 s  $\lambda = 1550 \text{ nm}$

- vstup port 1 a výstup na portoch 3 a 4 je 49,13% : 50,87%.
- vstup port 2 a výstup na portoch 3 a 4 je 51,09% : 48,91%.
- vstup port 3 a výstup na portoch 1 a 2 je 37,43% : 62,57%.
- vstup port 4 a výstup na portoch 1 a 2 je 37,60% : 62,40%.

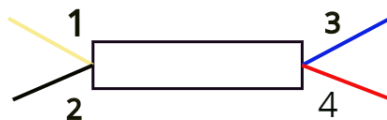
Z uvedeného vyplýva že deliaci pomer deliču SN: 72658887 je 38/62.

Delič výkonu 44/56 SN: 72658807 $\lambda = 1310 \text{ nm}$				
Port	Výkon[dBm]	Výkon[ $\mu$ W]	Vložný útlm[dB]	Izolácia [dB]
1 – 3	-13,10	48,97	3,93	–
3 – 1	-13,05	49,54	3,89	–
1 – 4	-12,06	62,23	2,89	–
4 – 1	-12,00	63,09	2,84	–
2 – 4	-13,55	44,15	4,38	–
4 – 2	-13,03	49,77	3,87	–
2 – 3	-12,36	58,07	3,19	–
3 – 2	-11,91	64,41	2,76	–
1 – 2	-50,0	0,01	–	40,83
2 – 1	-50,0	0,01	–	40,83
3 – 4	-50,0	0,01	–	40,83
4 – 3	-50,0	0,01	–	40,83

Tab. 9.3: Namerané parametre SN: 72658807 s referenciou -9,1 dBm.

Delič výkonu 48/52 SN: 72658807 $\lambda = 1550 \text{ nm}$				
Port	Výkon[dBm]	Výkon[ $\mu\text{W}$ ]	Vložný útlm[dB]	Izolácia [dB]
1 – 3	-11,78	66,37	3,65	–
3 – 1	-11,68	67,92	3,56	–
1 – 4	-11,47	71,28	3,34	–
4 – 1	-11,25	74,98	3,10	–
2 – 4	-11,79	66,22	3,65	–
4 – 2	-11,61	69,02	3,47	–
2 – 3	-11,51	70,63	3,38	–
3 – 2	-11,45	71,61	3,32	–
1 – 2	-50,0	0,01	–	41,02
2 – 1	-50,0	0,01	–	41,02
3 – 4	-50,0	0,01	–	40,05
4 – 3	-50,0	0,01	–	40,05

Tab. 9.4: Namerané parametre SN: 72658807 s referenciou -7,7 dBm.



Obr. 9.4: Schéma meraného deliča výkonu 72658807.

Výpočet deliaceho pomeru deliča výkonu SN: 72658807 s  $\lambda = 1310 \text{ nm}$

- vstup port 1 a výstup na portoch 3 a 4 je 44,04% : 55,96%.
- vstup port 2 a výstup na portoch 3 a 4 je 56,81% : 43,19%.
- vstup port 3 a výstup na portoch 1 a 2 je 43,48% : 56,52%.
- vstup port 4 a výstup na portoch 1 a 2 je 55,90% : 44,10%.

Z uvedeného vyplýva že deliaci pomer deliču SN: 72658807 je 44/56.

Výpočet deliaceho pomeru deliča výkonu SN: 72658807 s  $\lambda = 1550 \text{ nm}$

- vstup port 1 a výstup na portoch 3 a 4 je 48,22% : 51,78%.
- vstup port 2 a výstup na portoch 3 a 4 je 51,61% : 48,39%.
- vstup port 3 a výstup na portoch 1 a 2 je 48,68% : 51,32%.
- vstup port 4 a výstup na portoch 1 a 2 je 52,10% : 47,93%.

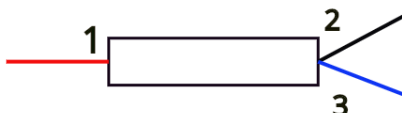
Z uvedeného vyplýva že deliaci pomer deliču SN: 72658807 je 48/52.

Delič výkonu 43/57 SN: A160022695 $\lambda = 1310 \text{ nm}$				
Port	Výkon[dBm]	Výkon[ $\mu\text{W}$ ]	Vložný útlm[dB]	Izolácia [dB]
1 – 3	-13,15	48,41	4,12	–
3 – 1	-13,33	46,45	4,31	–
1 – 2	-11,97	63,53	2,94	–
2 – 1	-11,65	68,39	2,63	–
2 – 3	-50,0	0,01	–	40,98
3 – 2	-50,0	0,01	–	40,98

Tab. 9.5: Namerané parametre SN: A160022695 s referenciou -9,1 dBm.

Delič výkonu 50/50 SN: A160022695 $\lambda = 1550 \text{ nm}$				
Port	Výkon[dBm]	Výkon[ $\mu\text{W}$ ]	Vložný útlm[dB]	Izolácia [dB]
1 – 3	-11,23	75,33	3,36	–
3 – 1	-11,66	68,23	3,79	–
1 – 2	-11,25	74,98	3,39	–
2 – 1	-11,25	74,98	3,38	–
2 – 3	-50,0	0,01	–	42,32
3 – 2	-50,0	0,01	–	42,32

Tab. 9.6: Namerané parametre SN: A160022695 s referenciou -7,7 dBm.



Obr. 9.5: Schéma meraného deliča výkonu A160022695.

Výpočet deliaceho pomeru deliča výkonu SN: A160022695 s  $\lambda = 1310 \text{ nm}$

- vstup port 1 a výstup na portoch 3 a 2 je 43,25% : 56,75%.

Z uvedeného vyplýva že deliaci pomer deliču SN: A160022695 je 43/57.

Výpočet deliaceho pomeru deliča výkonu SN: A160022695 s  $\lambda = 1550 \text{ nm}$

- vstup port 1 a výstup na portoch 3 a 4 je 50,12% : 49,88%.

Z uvedeného vyplýva že deliaci pomer deliču SN: A160022695 je 50/50.

Delič výkonu 40/60 SN: A160022688 $\lambda = 1310 \text{ nm}$				
Port	Výkon[dBm]	Výkon[ $\mu$ W]	Vložný útlm[dB]	Izolácia [dB]
2 – 3	-11,67	68,07	2,59	–
3 – 2	-11,41	72,27	2,34	–
3 – 1	-13,67	42,95	4,59	–
1 – 3	-13,65	43,15	4,57	–
4 – 1	-12,31	58,74	3,22	–
1 – 4	-11,86	65,16	2,77	–
4 – 2	-13,35	46,23	4,27	–
2 – 4	-13,21	47,75	4,14	–
1 – 2	-50,0	0,01	–	40,53
2 – 1	-50,0	0,01	–	40,53
2 – 3	-50,0	0,01	–	40,53
3 – 2	-50,0	0,01	–	40,53

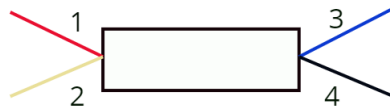
Tab. 9.7: Namerané parametre SN: A160022688 s referenciou -9,1 dBm.

Delič výkonu 50/50 SN: A160022688 $\lambda = 1550 \text{ nm}$				
Port	Výkon[dBm]	Výkon[ $\mu$ W]	Vložný útlm[dB]	Izolácia [dB]
2 – 3	-11,56	69,82	2,76	–
3 – 2	-10,94	80,53	2,14	–
3 – 1	-11,08	77,98	2,28	–
1 – 3	-11,20	75,85	2,39	–
4 – 1	-11,70	67,60	2,89	–
1 – 4	-11,19	76,03	2,38	–
4 – 2	-11,46	71,44	2,65	–
2 – 4	-11,49	70,95	2,68	–
1 – 2	-50,0	0,01	–	42,12
2 – 1	-50,0	0,01	–	42,12
2 – 3	-50,0	0,01	–	42,17
3 – 2	-50,0	0,01	–	42,17

Tab. 9.8: Namerané parametre SN: A160022688 s referenciou -7,7 dBm.

Výpočet deliaceho pomeru deliča výkonu SN: A160022688 s  $\lambda = 1310 \text{ nm}$

- vstup port 1 a výstup na portoch 3 a 4 je 39,81% : 60,19%.
- vstup port 2 a výstup na portoch 3 a 4 je 58,77% : 41,23%.
- vstup port 3 a výstup na portoch 1 a 2 je 37,28% : 62,72%.
- vstup port 4 a výstup na portoch 1 a 2 je 65,96% : 44,04%.



Obr. 9.6: Schéma meraného deliča výkonu A160022688.

Z uvedeného vyplýva že deliaci pomer deliču SN: A160022688 je 40/60.

Výpočet deliaceho pomeru deliča výkonu SN: A160022688 s  $\lambda = 1550 \text{ nm}$

- vstup port 1 a výstup na portoch 3 a 4 je 49,94% : 50,06%.
- vstup port 2 a výstup na portoch 3 a 4 je 49,60% : 50,40%.
- vstup port 3 a výstup na portoch 1 a 2 je 49,20% : 50,80%.
- vstup port 4 a výstup na portoch 1 a 2 je 48,62% : 51,38%.

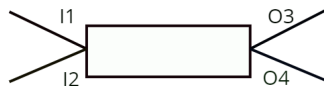
Z uvedeného vyplýva že deliaci pomer deliču SN: A160022688 je 50/50.

Delič výkonu 25/75 SN: 17012588 $\lambda = 1310 \text{ nm}$				
Port	Výkon[dBm]	Výkon[ $\mu$ W]	Vložný útlm[dB]	Izolácia [dB]
I1-O3	-10,58	87,50	1,85	—
O3-I1	-14,16	38,37	1,08	—
I1-O4	-15,58	27,67	6,84	—
O4-I1	-18,59	13,84	5,51	—
I2-O3	-15,11	30,83	6,37	—
O3-I2	-15,25	29,85	6,59	—
I2-O4	-10,24	94,62	1,51	—
O4-I2	-10,80	83,18	2,15	—
I1-I2	-50,00	0,01	—	36,91
I2-I1	-50,00	0,01	—	36,91
O3-O4	-50,00	0,01	—	36,91
O4-O3	-50,00	0,01	—	36,91

Tab. 9.9: Namerané parametre SN: 17012588 s referenciou -9,1 dBm.

Delič výkonu 50/50 SN: 17012588 $\lambda = 1550 \text{ nm}$				
Port	Výkon[dBm]	Výkon[ $\mu$ W]	Vložný útlm[dB]	Izolácia [dB]
I1-O3	-11,25	74,99	3,73	—
O3-I1	-11,13	77,09	3,24	—
I1-O4	-11,36	72,61	3,84	—
O4-I1	-11,17	76,38	3,27	—
I2-O3	-10,95	80,35	3,43	—
O3-I2	-11,22	75,51	3,31	—
I2-O4	-11,10	77,62	3,58	—
O4-I2	-10,73	84,53	2,84	—
I1-I2	-50,00	0,01	—	38,97
I2-I1	-50,00	0,01	—	38,97
O3-O4	-50,00	0,01	—	38,97
O4-O3	-50,00	0,01	—	33,97

Tab. 9.10: Namerané parametre SN: 17012588 s referenciou -7,7 dBm.



Obr. 9.7: Schéma meraného deliča výkonu 17012588.

Výpočet deliaceho pomeru deliča výkonu SN: 17012588 s  $\lambda = 1310 \text{ nm}$

- vstup port 1 a výstup na portoch 3 a 4 je 75,97% : 24,03%.
- vstup port 2 a výstup na portoch 3 a 4 je 24,58% : 75,42%.
- vstup port 3 a výstup na portoch 1 a 2 je 56,24% : 43,76%.
- vstup port 4 a výstup na portoch 1 a 2 je 14,27% : 85,73%.

Z uvedeného vyplýva že deliaci pomer deliču SN: 17012588 je 25/75.

Výpočet deliaceho pomeru deliča výkonu SN: 17012588 s  $\lambda = 1550 \text{ nm}$

- vstup port 1 a výstup na portoch 3 a 4 je 50,81% : 49,19%.
- vstup port 2 a výstup na portoch 3 a 4 je 50,86% : 49,14%.
- vstup port 3 a výstup na portoch 1 a 2 je 50,52% : 49,48%.
- vstup port 4 a výstup na portoch 1 a 2 je 47,47% : 52,53%.

Z uvedeného vyplýva že deliaci pomer deliču SN: 17012588 je 50/50.

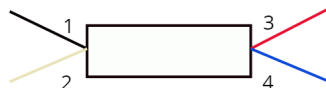


Delič výkonu 38/62 SN: 72658742 $\lambda = 1310 \text{ nm}$				
Port	Výkon[dBm]	Výkon[ $\mu$ W]	Vložný útlm[dB]	Izolácia [dB]
2 – 4	-15,38	28,97	6,03	–
4 – 2	-17,37	18,32	6,41	–
1 – 3	-17,48	17,86	6,51	–
3 – 1	-18,77	13,27	7,81	–
2 – 3	-17,52	17,70	6,56	–
3 – 2	-16,37	23,07	5,31	–
1 – 4	-17,94	16,07	6,97	–
4 – 1	-19,18	12,08	8,21	–
1 – 2	-45,88	0,02	–	36,23
2 – 1	-45,88	0,02	–	36,23
3 – 4	-50,00	0,01	–	40,65
4 – 3	-50,00	0,01	–	40,65

Tab. 9.11: Namerané parametre SN: 72658742 s referenciou -9,1 dBm.

Delič výkonu 45/55 SN: 72658742 $\lambda = 1550 \text{ nm}$				
Port	Výkon[dBm]	Výkon[ $\mu$ W]	Vložný útlm[dB]	Izolácia [dB]
2 – 4	-16,55	22,13	4,52	–
4 – 2	-17,47	17,91	5,42	–
1 – 3	-13,01	50,00	0,97	–
3 – 1	-15,68	27,04	3,64	–
2 – 3	-17,66	17,14	5,60	–
3 – 2	-16,20	23,99	4,14	–
1 – 4	-12,91	51,12	0,81	–
4 – 1	-15,66	27,16	3,61	–
1 – 2	-50,00	0,01	–	37,95
2 – 1	-50,00	0,01	–	37,95
3 – 4	-50,00	0,01	–	34,78
4 – 3	-50,00	0,01	–	34,78

Tab. 9.12: Namerané parametre SN: 72658742 s referenciou -7,7 dBm.



Obr. 9.8: Schéma meraného deliča výkonu 72658742.

Výpočet deliaceho pomeru deliča výkonu SN: 72658742 s  $\lambda = 1310 \text{ nm}$

- vstup port 1 a výstup na portoch 3 a 4 je 52,64% : 47,36%.
- vstup port 2 a výstup na portoch 3 a 4 je 37,93% : 62,07%.
- vstup port 3 a výstup na portoch 1 a 2 je 36,52% : 63,48%.
- vstup port 4 a výstup na portoch 1 a 2 je 39,74% : 60,26%.

Z uvedeného vyplýva že deliaci pomer deliču SN: 72658742 je 38/62.

Výpočet deliaceho pomeru deliča výkonu SN: 72658742 s  $\lambda = 1550 \text{ nm}$

- vstup port 1 a výstup na portoch 3 a 4 je 49,45% : 50,55%.
- vstup port 2 a výstup na portoch 3 a 4 je 43,65% : 56,35%.
- vstup port 3 a výstup na portoch 1 a 2 je 52,99% : 47,01%.
- vstup port 4 a výstup na portoch 1 a 2 je 60,26% : 39,74%.

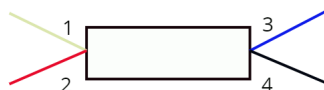
Z uvedeného vyplýva že deliaci pomer deliču SN: 72658742 je 45/55.

Delič výkonu 8/92 SN: A140062957 $\lambda = 1310 \text{ nm}$				
Port	Výkon[dBm]	Výkon[ $\mu$ W]	Vložný útlm[dB]	Izolácia [dB]
1 – 3	-9,62	109,14	0,50	–
3 – 1	-9,45	113,50	0,06	–
3 – 2	-19,71	10,69	10,19	–
2 – 3	-21,02	7,90	11,91	–
4 – 2	-9,51	111,94	0,02	–
2 – 4	-18,09	15,52	8,98	–
4 – 1	-19,58	11,01	10,05	–
1 – 4	-27,43	1,80	18,32	–
1 – 2	-43,96	0,04	–	35,18
2 – 1	-43,96	0,04	–	35,18
3 – 4	-50,00	0,01	–	41,21
4 – 3	-50,00	0,01	–	41,21

Tab. 9.13: Namerané parametre SN: A140062957 s referenciou -9,1 dBm.

Delič výkonu 10/90 SN: A140062957 $\lambda = 1550 \text{ nm}$				
Port	Výkon[dBm]	Výkon[ $\mu\text{W}$ ]	Vložný útlm[dB]	Izolácia [dB]
1 – 3	-8,47	142,23	0,71	–
3 – 1	-11,02	79,07	2,73	–
3 – 2	-18,71	13,45	10,43	–
2 – 3	-18,91	12,85	11,24	–
4 – 2	-13,80	41,69	2,38	–
2 – 4	-16,20	23,99	8,43	–
4 – 1	-25,68	2,70	14,18	–
1 – 4	-25,49	2,82	17,72	–
1 – 2	-39,24	0,12	–	31,22
2 – 1	-39,24	0,12	–	31,22
3 – 4	-50,00	0,01	–	41,97
4 – 3	-50,00	0,01	–	41,97

Tab. 9.14: Namerané parametre SN: A140062957 s referenciou -7,7 dBm.



Obr. 9.9: Schéma meraného deliča výkonu A140062957.

Výpočet deliaceho pomeru deliča výkonu SN: A140062957 s  $\lambda = 1310 \text{ nm}$

- vstup port 1 a výstup na portoch 3 a 4 je 98,38% : 1,62%.
- vstup port 2 a výstup na portoch 3 a 4 je 33,73% : 66,27%.
- vstup port 3 a výstup na portoch 1 a 2 je 91,39% : 8,61%.
- vstup port 4 a výstup na portoch 1 a 2 je 8,95% : 91,05%.

Z uvedeného vyplýva že deliaci pomer deliču SN: A140062957 je 8/92.

Výpočet deliaceho pomeru deliča výkonu SN: A140062957 s  $\lambda = 1550 \text{ nm}$

- vstup port 1 a výstup na portoch 3 a 4 je 98,05% : 1,95%.
- vstup port 2 a výstup na portoch 3 a 4 je 34,88% : 65,12%.
- vstup port 3 a výstup na portoch 1 a 2 je 85,46% : 14,54%.
- vstup port 4 a výstup na portoch 1 a 2 je 6,08% : 93,92%.

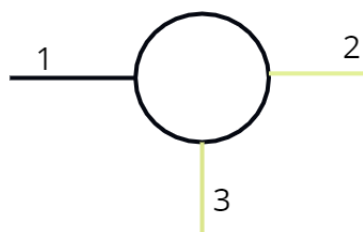
Z uvedeného vyplýva že deliaci pomer deliču SN: A140062957 je 10/90.

Cirkulátor SN: A16000037 $\lambda = 1310 \text{ nm}$					
Port	Výkon [dBm]	Výkon [ $\mu\text{W}$ ]	Vložný útlm[dB]	Izolácia [dB]	Presluch [dB]
1 – 2	-13,70	42,66	0,69 ( $\leq 1,5$ )	–	–
1 – 3	-50,00	0,01	–	–	36,99 ( $\geq 50$ )
2 – 3	-13,56	44,06	0,55 ( $\leq 1,5$ )	–	–
2 – 1	-50,00	0,01	–	36,99 ( $\geq 35$ )	–
3 – 2	-50,00	0,01	–	36,99 ( $\geq 35$ )	–
3 – 1	-50,00	0,01	–	36,99 ( $\geq 35$ )	–

Tab. 9.15: Namerané parametre SN: A16000037 s referenciou -9,1 dBm. Katalógová hodnota v zátvorke.

Cirkulátor SN: A16000037 $\lambda = 1550 \text{ nm}$					
Port	Výkon [dBm]	Výkon [ $\mu\text{W}$ ]	Vložný útlm[dB]	Izolácia [dB]	Presluch [dB]
1 – 2	-12,49	56,36	0,03 ( $\leq 1,5$ )	–	–
1 – 3	-28,93	1,27	–	–	16,39 ( $\geq 50$ )
2 – 3	-12,83	52,12	0,27 ( $\leq 1,5$ )	–	–
2 – 1	-50,00	0,01	–	37,46 ( $\geq 35$ )	–
3 – 2	-50,00	0,01	–	37,46 ( $\geq 35$ )	–
3 – 1	-29,09	1,23	–	16,59 ( $\geq 35$ )	–

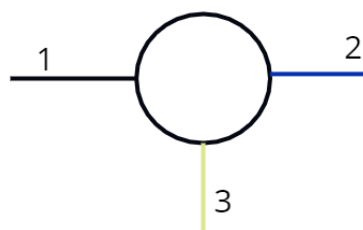
Tab. 9.16: Namerané parametre SN: A16000037 s referenciou -7,7 dBm. Katalógová hodnota v zátvorke.



Obr. 9.10: Schéma meraného cirkulátoru A16000037, 18040064 a 18040004.

Cirkulátor SN: 18040064 $\lambda = 1310 \text{ nm}$					
Port	Výkon [dBm]	Výkon [ $\mu\text{W}$ ]	Vložný útlm [dB]	Izolácia [dB]	Presluch [dB]
1 – 2	-11,23	75,34	2,41 ( $\leq 1,5$ )	–	–
2 – 1	-24,13	3,86	–	15,32 ( $\geq 35$ )	–
2 – 3	-11,30	74,13	2,49 ( $\leq 1,5$ )	–	–
3 – 2	-24,90	3,24	–	16,10 ( $\geq 35$ )	–
3 – 1	-50,00	0,01	–	41,19 ( $\geq 35$ )	–
1 – 3	-50,00	0,01	–	–	41,19 ( $\geq 50$ )

Tab. 9.17: Namerané parametre SN: 18040064 s referenciou -9,1 dBm. Katalógová hodnota v zátvorke.



Obr. 9.11: Schéma meraného cirkulátoru A15069358.

Cirkulátor SN: 18040064 $\lambda = 1550 \text{ nm}$					
Port	Výkon [dBm]	Výkon [ $\mu$ W]	Vložný útlm[dB]	Izolácia [dB]	Presluch [dB]
1 – 2	-8,13	153,82	0,44 ( $\leq 1,5$ )	–	–
2 – 1	-50,00	0,01	–	42,31 ( $\geq 35$ )	–
2 – 3	-8,20	151,36	0,51 ( $\leq 1,5$ )	–	–
3 – 2	-50,00	0,01	–	42,31 ( $\geq 35$ )	–
3 – 1	-50,00	0,01	–	42,31 ( $\geq 35$ )	–
1 – 3	-50,00	0,01	–	–	42,31 ( $\geq 50$ )

Tab. 9.18: Namerané parametre SN: 18040064 s referenciou -7,7 dBm. Katalógová hodnota v zátvorke.

Cirkulátor (vadný) SN: 18040004 $\lambda = 1310 \text{ nm}$					
Port	Výkon [dBm]	Výkon [ $\mu$ W]	Vložný útlm[dB]	Izolácia [dB]	Presluch [dB]
1 – 2	-16,38	23,01	2,82 ( $\leq 1,5$ )	–	–
2 – 1	-29,85	1,04	–	16,29 ( $\geq 35$ )	–
2 – 3	-18,81	13,15	5,34 ( $\leq 1,5$ )	–	–
3 – 2	-30,02	1,00	–	16,46 ( $\geq 35$ )	–
3 – 1	-50,00	0,01	–	36,44 ( $\geq 35$ )	–
1 – 3	-50,00	0,01	–	–	36,44 ( $\geq 50$ )

Tab. 9.19: Namerané parametre SN: 18040004 s referenciou -9,1 dBm. Katalógová hodnota v zátvorke.

Cirkulátor (vadný) SN: 18040004 $\lambda = 1550 \text{ nm}$					
Port	Výkon [dBm]	Výkon [ $\mu\text{W}$ ]	Vložný útlm[dB]	Izolácia [dB]	Presluch [dB]
1 – 2	-15,02	31,48	2,86 ( $\leq 1,5$ )	–	–
2 – 1	-50,00	0,01	–	37,84 ( $\geq 35$ )	–
2 – 3	-15,01	31,55	2,84 ( $\leq 1,5$ )	–	–
3 – 2	-50,00	0,01	–	37,84 ( $\geq 35$ )	–
3 – 1	-50,00	0,01	–	37,84 ( $\geq 35$ )	–
1 – 3	-50,00	0,01	–	–	37,84 ( $\geq 50$ )

Tab. 9.20: Namerané parametre SN: 18040004 s referenciou -7,7 dBm. Katalógová hodnota v zátvorke.

Cirkulátor SN: A15069358 $\lambda = 1310 \text{ nm}$					
Port	Výkon [dBm]	Výkon [ $\mu\text{W}$ ]	Vložný útlm[dB]	Izolácia [dB]	Presluch [dB]
1 – 2	-13,71	42,56	4,32 ( $\leq 1,5$ )	–	–
1 – 3	-50,00	0,01	–	–	40,61 ( $\geq 50$ )
2 – 3	-14,10	38,90	4,41 ( $\leq 1,5$ )	–	–
2 – 1	-24,04	3,94	–	15,67 ( $\geq 35$ )	–
3 – 2	-25,64	2,73	–	16,23 ( $\geq 35$ )	–
3 – 1	-50,00	0,01	–	40,61 ( $\geq 35$ )	–

Tab. 9.21: Namerané parametre SN: A15069358 s referenciou -9,1 dBm. Katalógová hodnota v zátvorke.

Cirkulátor SN: A15069358 $\lambda = 1550 \text{ nm}$					
Port	Výkon [dBm]	Výkon [ $\mu$ W]	Vložný útlm [dB]	Izolácia [dB]	Presluch [dB]
1 – 2	-8,74	133,66	0,97 ( $\leq 1,5$ )	–	–
1 – 3	-50,00	0,01	–	–	42,22 ( $\geq 50$ )
2 – 3	-9,11	122,74	1,34 ( $\leq 1,5$ )	–	–
2 – 1	-50,00	0,01	–	42,22 ( $\geq 35$ )	–
3 – 2	-50,00	0,01	–	42,22 ( $\geq 35$ )	–
3 – 1	-50,00	0,01	–	42,22 ( $\geq 35$ )	–

Tab. 9.22: Namerané parametre SN: A15069358 s referenciou -7,7 dBm. Katalógová hodnota v zátvorke.

Izolátor SN: 16004052 $\lambda = 1310 \text{ nm}$				
Port	Výkon [dBm]	Výkon [ $\mu$ W]	Vložný útlm [dB]	Izolácia [dB]
vstup-výstup	-10,6	87,10	1,3 ( $\leq 0,8$ )	–
výstup-vstup	-17,54	17,62	–	8,44 ( $\geq 50$ )

Tab. 9.23: Namerané parametre SN: 16004052 s referenciou -9,1 dBm. Katalógová hodnota v zátvorke.

Izolátor SN: 16004052 $\lambda = 1550 \text{ nm}$				
Port	Výkon [dBm]	Výkon [ $\mu$ W]	Vložný útlm [dB]	Izolácia [dB]
vstup-výstup	-8,03	157,40	0,18 ( $\leq 0,8$ )	–
výstup-vstup	-41,32	0,07	–	33,46 ( $\geq 50$ )

Tab. 9.24: Namerané parametre SN: 16004052 s referenciou -7,7 dBm. Katalógová hodnota v zátvorke.



Izolátor SN: 19072455 $\lambda = 1310 \text{ nm}$				
Port	Výkon [dBm]	Výkon [ $\mu\text{W}$ ]	Vložný útlm [dB]	Izolácia [dB]
vstup-výstup	-11,46	71,45	2,18 ( $\leq 0,8$ )	–
výstup-vstup	-24,70	3,39	–	16,46 ( $\geq 50$ )

Tab. 9.25: Namerané parametre SN: 19072455 s referenciou -9,1 dBm. Katalógová hodnota v zátvorke.

Izolátor SN: 19072455 $\lambda = 1550 \text{ nm}$				
Port	Výkon [dBm]	Výkon [ $\mu\text{W}$ ]	Vložný útlm [dB]	Izolácia [dB]
vstup-výstup	-8,06	156,31	0,53 ( $\leq 0,8$ )	–
výstup-vstup	-50,00	0,01	–	42,46 ( $\geq 50$ )

Tab. 9.26: Namerané parametre SN: 19072455 s referenciou -7,7 dBm. Katalógová hodnota v zátvorke.

Izolátor SN: 19072181 $\lambda = 1310 \text{ nm}$				
Port	Výkon [dBm]	Výkon [ $\mu\text{W}$ ]	Vložný útlm [dB]	Izolácia [dB]
vstup-výstup	-11,39	72,61	2,75 ( $\leq 0,8$ )	–
výstup-vstup	-25,14	3,06	–	16,49 ( $\geq 50$ )

Tab. 9.27: Namerané parametre SN: 19072181 s referenciou -9,1 dBm. Katalógová hodnota v zátvorke.

Izolátor SN: 19072181 $\lambda = 1550 \text{ nm}$				
Port	Výkon [dBm]	Výkon [ $\mu\text{W}$ ]	Vložný útlm [dB]	Izolácia [dB]
vstup-výstup	-8,28	148,59	0,35 ( $\leq 0,8$ )	–
výstup-vstup	-50,00	0,01	–	42,06 ( $\geq 50$ )

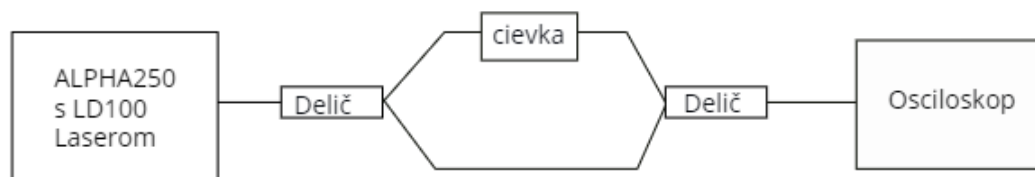
Tab. 9.28: Namerané parametre SN: 19072181 s referenciou -7,7 dBm. Katalógová hodnota v zátvorke.



Obr. 9.12: Schéma meraného izolátoru 19072181, 19072455 a 16004052.

## 9.2 Návrh merania opto-elektronických komponentov

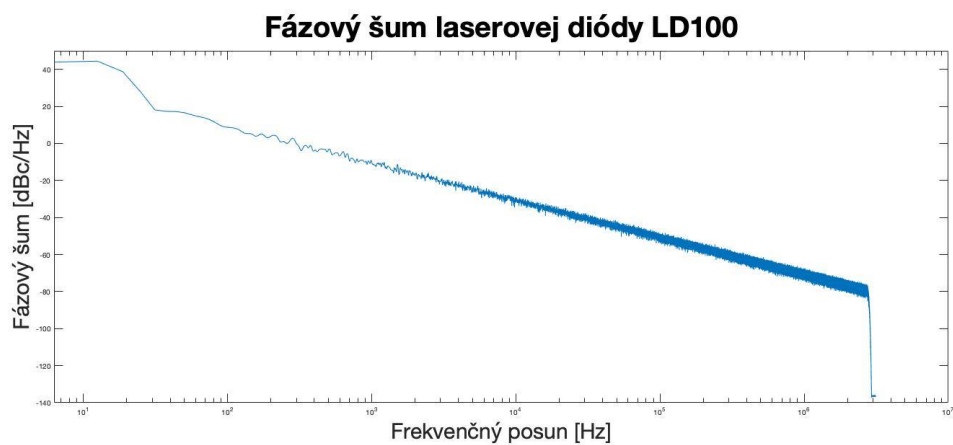
Fázový šum a šírka pásma bude zmeraná pomocou programovateľnej dosky ALPHA250. Na meranie budú použité dva deliče výkonu a cievka, ktorá sa pridáva, kvôli minimalizácii rušenia z laseru. Na výstupe bude pripojený notebook s programom pre meranie fázového šumu a koherenčnej dĺžky. Z nameraných hodnôt nám program vykreslí graf. Návrh merania šírky pásma DFB laseru je na obrázku 9.13.



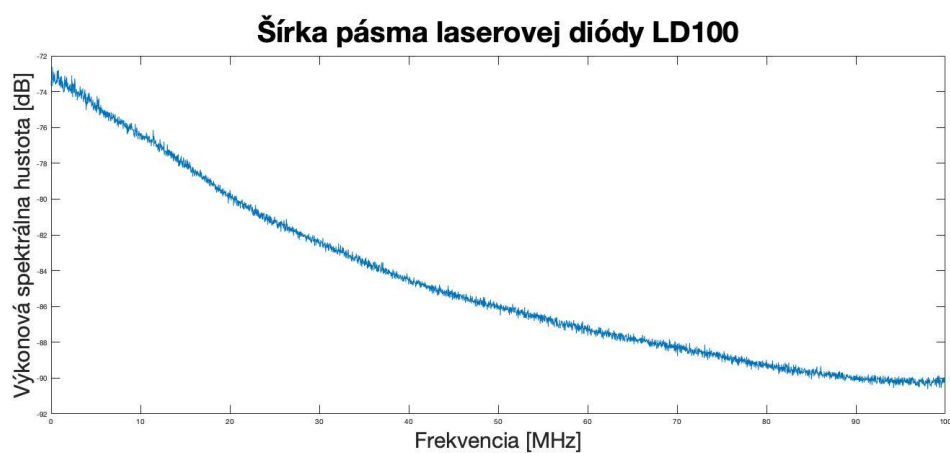
Obr. 9.13: Metóda merania šírky pásma laseru [13].

### 9.2.1 Meranie laserových diód

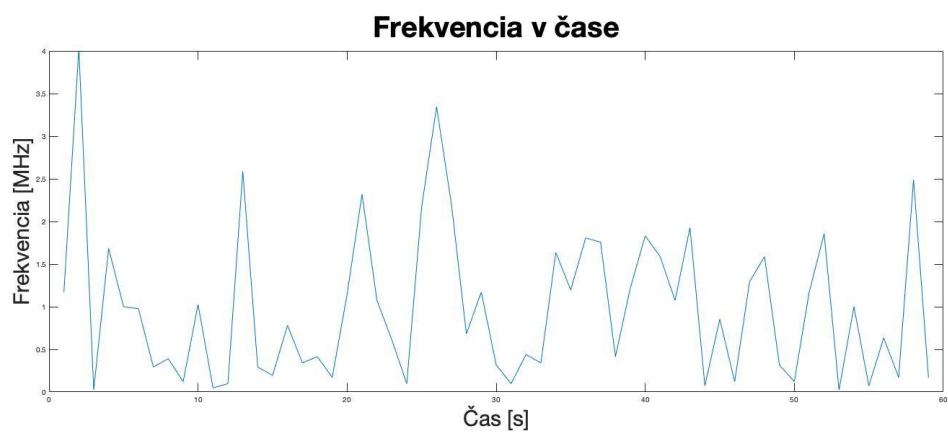
Pri laserovej dióde bol meraný fázový šum a šírka pásma laserovej diódy. Na meranie bola použitá programovateľná doska ALPHA250 od výrobcu Koheron. Zdrojový kód, ktorý je pre vývojovú dosku ALPHA250 dostupný na github, bol upravený na meranie fázového šumu a koherenčnej dĺžky. Alpha250 je programovateľná doska postavená na Zynq 7020 SoC. Je vybavená front-endom s frekvenciou 100 MHz so 14-bitovými analógovo-digitálnym konvertorom a 16-bitovými digitálne-analógovým konvertorom pri 250 MSPS. RF kanály sú taktované duálnym generátorom hodín s ultra vysokým jitterom PLL. Obsahuje 4-kanálový 24-bitový ADC a 4-kanálový 16-bitový DAC. Program pre meranie fázového šumu a koherenčnej dĺžky bol spúšťaný v operačnom systéme Linux. Výsledky merania fázového šumu je vidieť na obrázku 9.14. Z grafu je vidieť, že so zvyšujúcou sa frekvenciou klesá fázový šum. Pre meranie šírky pásma laseru bol program prepnutý na meranie šírky pásma. Po dokončení merania laseru LD100 program z nameraných hodnôt vykreslil graf, ktorý je na obrázku 9.15. Z grafu je vidieť, že pri poklese o -3 dB je šírka pásma približne 8,8 MHz. Frekvenciu v čase je vidieť na obrázku 9.16.



Obr. 9.14: Fázový šum laserovej diódy LD100.



Obr. 9.15: Šírka pásma laserovej diódy LD100.



Obr. 9.16: Frekvencia v čase pri laserovej dióde LD100.

## ZÁVER

Cieľ diplomovej práce bol teoretický rozbor optických a opto-elektronických komponentov, ktorými sú deliče výkonu, cirkulátory, izolátory, laserové diódy, fotodetektory a modulátory.

Pre jednotlivé komponenty boli definované základné parametre merania spolu s vysvetlením týchto parametrov. V práci je popísaný návrh merania optických komponentov ako aj opto-elektronických komponentov. Následne boli zmerané štyri vybrané druhy komponentov podľa postupu v návrhu merania.

Pre meranie bolo vybraných sedem deličov výkonu, štyri cirkulátory, tri izolátory a jedna laserová dióda. Zmerané parametre optických komponentov boli zapísané do prehľadnej tabuľky. Všetky optické komponenty boli zmerané pre dve vlnové dĺžky, a to 1310 nm a 1550 nm. Pod každou tabuľkou s meraniami danej optickej súčiastky sa nachádza schéma súčiastky. Pri laserovej dióde je zobrazený graf merania. Pre veľmi veľké množstvo nameraných hodnôt, z dôvodu presnosti vykreslenia grafu, sa v práci nenachádza tabuľka s nameranými hodnotami laserovej diódy. Parametre laserovej diódy boli odčítané z vykresleného grafu.

Po porovaní nameraných hodnôt s katalógovými hodnotami sa všetky deliče výkonu dajú považovať za kvalitné. Väčšina deličov výkonu sú 50:50, to znamená že 50 % výkonu je prenesených na jeden port a 50 % výkonu na druhý port. Z nameraných hodnôt je vidieť, že deliaci pomer nieje úplne presný a skôr sa jedná o pomer 48:52, 43:57, 44:56... Tieto rozdiely môžu byť spôsobené nepresnosťou merania. Merané cirkulátory rovnako odpovedajú katalógovým hodnotám. Najlepšie výsledky mal cirkulátor SN: 18040064 a SN: A15069358, ktorých izolácia aj presluch pri vlnovej dĺžke 1550 nm presahuje 42 dB. Cirkulátor SN: A16000037 má nízku hodnotu útlmu ale jeho izolácia je pod 38 dB. Cirkulátor SN: 18040004 bol vyhodnotený ako vadný, z dôvodu jeho vysokého vložného útlmu a nízkej izolácii. Hodnoty udávané výrobcami sú v tabuľkách označené zelenou farbou. Všetky merané izolátory sú kvalitné a odpovedajú katalógovým hodnotám. Najlepšie výsledky dosahujú pri vlnovej dĺžke 1550 nm izolátory SN: 19072455 a SN: 19072181. Oba izolátory majú nízky vložný útlm a izoláciu nad 42 dB.

Meraná laserová dióda sa dá považovať za kvalitnú. Pre vyššie frekvencie klesá fázový šum. Meraný laser LD100 má šírku pásma 8,8.

# LITERATÚRA

- [1] FILKA, Miloslav *Přenosová média*. Brno: Vysoké učení technické v Brně Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Ústav telekomunikací Purkyňova 118, 612 00 Brno, 2012. ISBN 978-80-214-4444-7.[cit. 2019-10-29].
- [2] *OPTICAL FIBER COUPLERS* [online]. FOSCO [cit. 2019-12-03]. Dostupné z URL:  
<https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95047750-optical-fiber-couplers>;
- [3] PASCHOTTA, Rüdiger. *Fiber Couplers* [online]. RP Photonics Encyclopedia [cit. 2019-12-03]. Dostupné z URL:  
[https://www.rp-photonics.com/fiber\\_couplers.html](https://www.rp-photonics.com/fiber_couplers.html);
- [4] *Fiber Coupler Tutorials*. [online]. Thorlabs [cit. 2019-12-03]. Dostupné z URL:  
[https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=10758](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=10758);
- [5] *Fiber Optic Coupler* [online]. Techopedia [cit. 2019-12-03]. Dostupné z URL:  
<https://www.techopedia.com/definition/30643/fiber-optic-coupler>;
- [6] *Optical Isolator*. [online]. Techopedia [cit. 2019-10-29]. Dostupné z URL:  
<https://www.techopedia.com/definition/14987/optical-isolator>;
- [7] *Optical Isolator Tutorial*. [online]. Thorlabs [cit. 2019-10-29]. Dostupné z URL:  
[https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=9017](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=9017);
- [8] *Faradayův jev (magnetooptika)*. [online]. Ises.info, 2013 [cit. 2019-10-29]. Dostupné z URL:  
<http://www.ises.info/index.php/cs/laboratory/experiment/faraday/introduction>;
- [9] *RF Circulators*. [online]. Everythingrf [cit. 2019-10-29]. Dostupné z URL:  
<https://www.everythingrf.com/browse/microwave-rf-circulators>;
- [10] PASCHOTTA, Rüdiger. *Faraday Isolators*. [online]. RP Photonics Encyclopedia [cit. 2019-10-29]. Dostupné z URL:  
[https://www.rp-photonics.com/faraday\\_isolators.html](https://www.rp-photonics.com/faraday_isolators.html);
- [11] *ŠIROKOPÁSMOVÝ OPTICKÝ CÍRKULÁTOR A APLIKACE*. [online]. Rlc [cit. 2019-10-29]. Dostupné z URL:  
<https://rlc.cz/produkty/sirokopasmovy-opticky-cirkulator-aplikace>;

- [12] *Getting to Know Optical Circulator*. [online]. Fiber-optical-networking, 2016 [cit. 2019-10-29]. Dostupné z URL:  
<http://www.fiber-optical-networking.com/getting-know-optical-circulator.html>;
- [13] *Laser linewidth measurement* [online]. koheron.com [cit. 2019-12-09]. Dostupné z URL:  
<https://www.koheron.com/blog/2017/01/05/laser-linewidth-measurement>;
- [14] LUKÁŠ, Michal *Laserové diody Část 1 - Princip funkce laserových diod* [online]. elektrorevue, 2001 [cit. 2019-10-29]. ISBN 1213-1539. Dostupné z URL:  
<http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html>;
- [15] LUKÁŠ, Michal *Laserové diody 2 - Typy a struktury laserových diod* [online]. elektrorevue, 2001 [cit. 2019-10-29]. ISBN 1213-1539. Dostupné z URL:  
<http://www.elektrorevue.cz/clanky/01043/index.html>;
- [16] *Fabry Perot Diode Lasers, Single Mode* [online]. sacher-laser.com, [cit. 2019-12-02]. Dostupné z URL:  
[https://www.sacher-laser.com/home/laser-diodes/laser\\_diodes/fabry\\_perot/fabry\\_perot\\_diode\\_lasers\\_single\\_mode.html](https://www.sacher-laser.com/home/laser-diodes/laser_diodes/fabry_perot/fabry_perot_diode_lasers_single_mode.html);
- [17] LUKÁŠ, Michal *LASEROVÉ DIODY 3 Parametry laserových diod a jejich měření* [online]. elektrorevue, 2002 [cit. 2019-10-29]. ISBN 1213-1539. Dostupné z URL:  
<http://www.elektrorevue.cz/clanky/02023/index.html>;
- [18] PASCHOTTA, Rüdiger. *Coherence Length* [online]. RP Photonics Encyklopedie, [cit. 2020-05-07]. Dostupné z URL:  
[https://www.rp-photonics.com/coherence\\_length.html](https://www.rp-photonics.com/coherence_length.html);
- [19] *Coherence* [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z URL:  
<http://electron6.phys.utk.edu/optics421/modules/m5/Coherence.htm>;
- [20] DENINGER Anselm, Ph.D., RENNER Thomas, Ph.D. *Diode Lasers* [online]. Application, 2010 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z URL:  
[https://www.toptica.com/fileadmin/Editors\\_English/12\\_literature/01\\_quantum\\_technologies/toptica\\_12\\_orders\\_of\\_coherence\\_control.pdf](https://www.toptica.com/fileadmin/Editors_English/12_literature/01_quantum_technologies/toptica_12_orders_of_coherence_control.pdf);

- [21] GUGGENMOS, Joel *Minimization Of Laser Diode Relative Intensity Noise (RIN)* [online]. Optomechanical Design of Laser Transmitters and Receivers, 1989 [cit. 2019-12-02]. Dostupné z URL:  
<https://doi.org/10.1117/12.951301>;
- [22] OBARSKI Gregory E., HALE Paul D. *How to measure relative intensity noise in lasers* [online]. Laser Focus World, 1999 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z URL:  
<https://www.laserfocusworld.com/detectors-imaging/article/16548496/how-to-measure-relative-intensity-noise-in-lasers>;
- [23] LUKÁŠ, Michal *Laserové diody - Část 4. Napájení, impulsní režim a aplikace laserových diod.* [online]. elektrorevue, 2002 [cit. 2019-10-29]. ISBN 1213-1539. Dostupné z URL:  
<http://www.elektrorevue.cz/clanky/02059/index.html>;
- [24] PASCHOTTA, Rüdiger. *Photodetectors.* [online]. RP Photonics Encyclopedia [cit. 2019-10-29]. Dostupné z URL:  
<https://www.rp-photonics.com/photodetectors.html>;
- [25] *PIN PHOTODETECTOR CHARACTERISTICS FOR OPTICAL FIBER COMMUNICATION.* [online]. Fiberoptics4sale [cit. 2019-10-29]. Dostupné z URL:  
<https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95046662-pin-photodetector-characteristics-for-optical-fiber-communication>;
- [26] *Photodiode Technology.* [online]. Electronics-notes [cit. 2019-10-29]. Dostupné z URL:  
[https://www.electronics-notes.com/articles/electronic\\_components/diode/photodiode-detector-technology.php](https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/diode/photodiode-detector-technology.php);
- [27] *PN Photodiode & PIN Photo Diode* [online]. Electronics-notes [cit. 2019-10-29]. Dostupné z URL:  
[https://www.electronics-notes.com/articles/electronic\\_components/diode/photodiode-detector-pn-pin.php](https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/diode/photodiode-detector-pn-pin.php);
- [28] *Avalanche Photodiode* [online]. Electronics-notes [cit. 2019-10-29]. Dostupné z URL:  
[https://www.electronics-notes.com/articles/electronic\\_components/diode/photodiode-detector-avalanche.php](https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/diode/photodiode-detector-avalanche.php);
- [29] *Schottky Photodiode* [online]. Electronics-notes [cit. 2019-10-29]. Dostupné z URL:



- [https://www.electronics-notes.com/articles/electronic\\_components/diode/photodiode-detector-schottky.php](https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/diode/photodiode-detector-schottky.php);
- [30] PASCHOTTA, Rüdiger. *Electro-optic Modulators*. [online]. RP Photonics Encyclopedia [cit. 2019-10-29]. Dostupné z URL: [https://www.rp-photonics.com/electro\\_optic\\_modulators.html](https://www.rp-photonics.com/electro_optic_modulators.html);
- [31] *Electro-Optic Modulator Selection Guide* [online]. newport.com [cit. 2019-12-21]. Dostupné z URL: <https://www.newport.com/g/electro-optic-modulator-selection-guide>;
- [32] RASHED Ahmed Nabih zaki *Ultra High Speed Linbo3 And Polymer Electrooptic Modulators In Lightwave Optical Access Communication Networks* [online]. researchgate [cit. 2019-10-29]. Dostupné z URL: [https://www.researchgate.net/figure/Direct-Modulation-Scheme\\_fig3\\_216526266](https://www.researchgate.net/figure/Direct-Modulation-Scheme_fig3_216526266);
- [33] PASCHOTTA, Rüdiger. *Acousto-optic Modulators*. [online]. RP Photonics Encyclopedia [cit. 2019-10-29]. Dostupné z URL: [https://www.rp-photonics.com/acousto\\_optic\\_modulators.html](https://www.rp-photonics.com/acousto_optic_modulators.html);
- [34] *MAMO-008665-ES0018 Datasheet (PDF) - M/A-COM Technology Solutions, Inc.* [online]. alldatasheet [cit. 2019-10-29]. Dostupné z URL: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/302649/MA-COM/MAMO-008665-ES0018.html>;